



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESCÁNER 3D BASADO
EN VISIÓN ARTIFICIAL ESTÉREO PARA EL MODELADO Y
PROTOTIPADO DE PRÓTESIS ORTOPÉDICAS PASIVAS POR
DEBAJO DEL CODO”**

Trabajo de titulación presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTORES: HENRY PAÚL LEMA ORDÓÑEZ
PAÚL NICOLAI MARTÍNEZ LUZURIAGA
TUTOR: ING. JORGE LUIS PAUCAR SAMANIEGO

Riobamba – Ecuador

2017

©2017, Henry Paúl Lema Ordóñez y Paúl Nicolai Martínez Luzuriaga

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo a la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESCÁNER 3D BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL ESTÉREO PARA EL MODELADO Y PROTOTIPADO DE PRÓTESIS ORTOPÉDICAS PASIVAS POR DEBAJO DEL CODO”, de responsabilidad de los señores Henry Paúl Lema Ordóñez y Paúl Nicolai Martínez Luzuriaga, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Ing. Washington Luna Encalada DECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	-----	-----
Ing. Freddy Chávez V. DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES	-----	-----
Ing. Jorge Luis Paucar S. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	-----	-----
Ing. Jorge Vicente Yuquilema I. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	-----	-----

“Nosotros, **HENRY PAÚL LEMA ORDÓÑEZ** y **PAÚL NICOLAI MARTÍNEZ LUZURIAGA**, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**”.

Henry Paúl Lema Ordóñez
060359729-5

Paúl Nicolai Martínez Luzuriaga
110515456-9

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a Dios por iluminarme; a mis padres y hermana por ser la luz más brillante y cálida en el universo.

Henry

Dedico este trabajo primeramente a Dios, que ha sido siempre la guía frente a las adversidades; a mis padres que han sido el más grande apoyo en este recorrer, y a mis hermanas por estar siempre a mi lado a pesar de la distancia, convirtiéndose en una gran motivación.

Paúl

AGRADECIMIENTO

Eterna gratitud a nuestras familias, por ser el motor que impulsó nuestro accionar cada día durante este trayecto.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por aportar positivamente a la sociedad con educación de calidad, a la Facultad de Informática y Electrónica por moldear nuestras mentes, para convertirnos en buenos profesionales, al Grupo de Investigación y Estudios de Bioingeniería de la Facultad de Mecánica por brindarnos acceso a sus instalaciones durante el proceso de construcción y desarrollo de pruebas de funcionamiento de nuestro trabajo de titulación.

A los compañeros y amigos que han extendido su mano para colaborarnos durante los momentos más complicados de este recorrido.

Finalmente, extendemos un sincero agradecimiento a nuestro tutor y amigo, Ing. Jorge Paucar, por guiarnos en la elaboración del trabajo de titulación.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Amperios
ABS	Arylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
CAD	Computer-Aided Design (Diseño asistido por computador)
CCD	Charged Coupled Device (Dispositivo de carga acoplada)
cm	Centímetros
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico)
GPIO	General Purpose Input Output (Puerto de Entrada/Salida de Propósito General)
kg	Kilogramos
HSV	Hue, Saturation, Value. (Tono, Saturación, Valor)
m	Metros
mH	Mili henrios
mm	Milímetros
N	Newtons
s	Segundos
PLA	Polylactic Acid (Ácido Poliláctico)
PLY	Polygon File Format. (Formato de Archivo de Polígonos)
RANSAC	Random Sample Consensus (Nombre de algoritmo para encontrar un modelo matemático para un conjunto de datos experimentales.)
RGB	Red, Green, Blue. (Rojo, Verde, Azul)
V	Voltaje
VNC	Virtual Network Computer (Computación Virtual en Red)
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN.....	6
SUMMARY	7
INTRODUCCIÓN	8

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
1.1. Visión Artificial.....	13
<i>1.1.1. Definición.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2. Función.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.3. Partes del sistema.....</i>	<i>14</i>
<i>1.1.3.1. Sensor de imagen.....</i>	<i>14</i>
<i>1.1.3.2. Fuentes de iluminación.....</i>	<i>15</i>
<i>1.1.4. Tipos de información.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.4.1. Información bidimensional.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.4.2. Información tridimensional.....</i>	<i>16</i>
<i>1.1.5. Etapas de un sistema de visión artificial.....</i>	<i>17</i>
<i>1.1.5.1. Adquisición de imágenes.....</i>	<i>17</i>
<i>1.1.5.2. Pre procesamiento de imágenes.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.5.3. Procesamiento de imágenes.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.5.4. Segmentación.....</i>	<i>19</i>

1.1.5.5.	<i>Extracción de características</i>	20
1.2.	Digitalización tridimensional	20
1.2.1.	<i>Definición</i>	20
1.2.2.	<i>Características</i>	21
1.2.2.1.	<i>Métodos</i>	22
1.2.3.	<i>Aplicaciones</i>	24
1.2.4.	<i>Nube de puntos</i>	24
1.2.5.	<i>Hardware</i>	25
1.2.5.1.	<i>Kinect</i>	25
1.2.5.2.	<i>Ciclop 3D scanner</i>	27
1.2.5.3.	<i>Go!Scan 20</i>	28
1.2.6.	<i>Software</i>	29
1.2.6.1.	<i>Matlab</i>	29
1.2.6.2.	<i>Horus</i>	29
1.2.6.3.	<i>OpenCV</i>	30
1.3.	Prótesis ortopédicas	31
1.3.1.	<i>Definición</i>	31
1.3.2.	<i>Avances en la tecnología protésica</i>	31
1.3.3.	<i>Tipos de prótesis</i>	33
1.3.3.1.	<i>Según nivel de amputación:</i>	33
1.3.3.2.	<i>Según material constitutivo:</i>	33
1.3.3.3.	<i>Según función:</i>	33
1.4.	Componentes electrónicos del escáner 3D	33
1.4.1.	<i>Microcomputador Raspberry Pi</i>	33
1.4.2.	<i>Cámaras digitales Raspberry Pi Camera</i>	35
1.4.3.	<i>Módulo multicámara para Raspberry Pi</i>	36
1.4.4.	<i>Láser</i>	36
1.4.5.	<i>Tarjeta de desarrollo NodeMcu</i>	37
1.4.6.	<i>Motor paso a paso</i>	38

1.4.7.	<i>Driver de motor TB6600</i>	38
1.4.8.	<i>Fuente de poder</i>	40
1.5.	Software para procesamiento de imágenes	41
1.5.1.	<i>Sistema Operativo Raspbian</i>	41
1.5.2.	<i>Sistema Operativo Ubuntu Mate</i>	41
1.5.3.	<i>Python 2.7</i>	42
1.5.4.	<i>Ide Arduino</i>	42

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	44
2.1.	Diseño e Implementación	45
2.2.	Descripción General del Sistema de Escaneo	46
2.2.1.	<i>Principales requerimientos del escáner 3D</i>	46
2.3.	Hardware	46
2.3.1.	<i>Sistema de Aislamiento Lumínico</i>	47
2.3.2.	<i>Fuente de Alimentación</i>	47
2.3.3.	<i>Control de Sistema Rotatorio</i>	48
2.3.3.1.	<i>Motor paso a paso</i>	48
2.3.3.2.	<i>Tarjeta de Desarrollo NodeMCU v3</i>	49
2.3.3.3.	<i>Controlador de motor TB6600</i>	49
2.3.3.4.	<i>Comunicación NodeMCU y Raspberry</i>	50
2.3.4.	<i>Adquisición de Datos</i>	51
2.3.4.1.	<i>Cámaras Pi Camera V 1</i>	51
2.3.4.2.	<i>Tarjeta Multi Camera Adapter Module for Raspberry Pi</i>	51
2.3.4.3.	<i>Láser</i>	52
2.3.4.4.	<i>Colocación de las Cámaras</i>	53
2.3.4.5.	<i>Caracterización del sistema de Escaneo</i>	54
2.3.4.6.	<i>Obtención de relaciones existentes entre medidas en pixeles y medidas reales</i>	55
2.3.5.	<i>Procesamiento de Datos</i>	59

2.3.5.1.	<i>Raspberry PI 3</i>	59
2.4.	Software	60
2.4.1.	<i>Ubuntu Mate</i>	60
2.4.2.	<i>Python</i>	61
2.4.3.	<i>OpenCV</i>	61
2.4.4.	<i>Tkinter</i>	62
2.4.5.	<i>VNC</i>	63
2.4.6.	<i>Diagramas de flujo de programas desarrollados</i>	65
2.4.6.1.	<i>Diagrama de Flujo de Interfaz Gráfica de Usuario</i>	65
2.4.6.2.	<i>Diagrama de Flujo de Programa de Tarjeta de Desarrollo NodeMCU</i>	66
2.4.6.3.	<i>Diagrama de Flujo de Programa de Calibración de Láser</i>	66
2.4.6.4.	<i>Diagrama de Flujo de Programa de Captura de Imágenes</i>	67
2.4.6.5.	<i>Diagrama de Flujo de Programa de Preprocesamiento de Imágenes</i>	68
2.4.6.6.	<i>Diagrama de Flujo de Programa de Procesamiento de Imágenes</i>	69
2.5.	Mecánica del Sistema	70
2.5.1.	<i>Determinación de torque necesario en el sistema rotacional</i>	70
2.5.2.	<i>Sistema Rotacional</i>	72
2.5.2.1.	<i>Tren de engranajes</i>	72
2.5.2.2.	<i>Eje transversal de aluminio</i>	74
2.5.2.3.	<i>Sistema de captura</i>	75
2.5.3.	<i>Equilibrio de pesos en el sistema rotacional</i>	75
 CAPÍTULO III		
3.	MARCO DE RESULTADOS	78
3.1.	Determinación de indicadores	78
3.1.1.	<i>Indicadores para contraste</i>	78
3.1.2.	<i>Número de pruebas</i>	79
3.2.	Post-procesamiento de nube de puntos	79
3.2.1.	<i>Procesamiento dentro de MeshLab</i>	80

3.3.	Pruebas de rapidez del sistema.....	83
3.3.1.	Mediciones de tiempo requerido en cada etapa.....	83
3.3.1.1.	Tiempo total de adquisición de datos.....	84
3.3.1.2.	Tiempo total de preprocesamiento de imágenes.....	85
3.3.1.3.	Tiempo total de procesamiento de datos.....	86
3.3.2.	Tiempo total estimado de adquisición y procesamiento de datos.....	87
3.3.3.	Pruebas de precisión del sistema.....	87
3.3.3.1.	Cálculo de diferencia entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows.....	88
3.3.3.2.	Cálculo de error absoluto entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows	93
3.3.3.3.	Cálculo de error relativo entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows	95
3.3.3.4.	Conclusión en base a datos recabados.....	96
3.3.4.	Mediciones de exactitud	97
3.3.4.1.	Comparación entre medidas obtenidas por medio de Cámaras y medida real.....	97
3.3.4.2.	Cálculo de error absoluto entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y medidas reales	99
3.3.4.3.	Conclusiones en base a datos recabados	101
3.4.	Análisis de costos	101
3.4.1.	Costos de materiales y herramientas.....	101
3.4.2.	Costos de equipos.....	102
3.4.3.	Costos de implementación	103
3.4.4.	Costo total de implementación del dispositivo	103
3.4.5.	Costo aproximado de prototipado de prótesis vía Impresión 3D.....	103
3.4.5.1.	Según software Repetier Host.....	105
3.4.5.2.	Según software Cura Engine	104
	CONCLUSIONES.....	106
	RECOMENDACIONES.....	107
	BIBLIOGRAFÍA	

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Componentes Sistema de Visión Artificial	14
Figura 2-1 Tipos de sensores: CCD y CMOS	15
Figura 3-1 Geometría Epipolar	16
Figura 4-1 Ejemplo adquisición de imagen	17
Figura 5-1 Ejemplo preprocesamiento	18
Figura 6-1 Ejemplo reducción de ruido	19
Figura 7-1 Ejemplo de segmentación.....	19
Figura 8-1 Ejemplo de extracción de características.....	20
Figura 9-1 Escaneo 3D Láser de Escultura	21
Figura 10-1 Escaner 3D de contacto	22
Figura 11-1 Escaner 3D portable	23
Figura 12-1 Imagen 3D a partir de un ultrasonido.....	23
Figura 13-1 Estructura representada mediante nube de puntos.....	24
Figura 14-1 Matriz de nube de puntos leída en Matlab	25
Figura 15-1 Dispositivo Kinect.....	25
Figura 16-1 Información de profundidad con Kinect	26
Figura 17-1 Escaner Ciclop 3D.....	27
Figura 18-1 Go!Scan 20.....	28
Figura 19-1 Nube de puntos graficada en Matlab	29
Figura 20-1 Reconstrucción con el software Horus.....	30
Figura 21-1 Detección de letras con OpenCV	30
Figura 22-1 Prótesis ortopédica activa.....	31
Figura 23-1 Prótesis ortopédica pasiva	32
Figura 24-1 Prótesis ortopédica pasiva impresa en 3D	32
Figura 25-1 Raspberry Pi 3	34
Figura 26-1 Raspberry Pi Camera.....	35
Figura 27-1 Sistema Multicámara.....	36
Figura 28-1 Láser.....	36
Figura 29-1 Tarjeta NodeMCU.....	37
Figura 30-1 Motor paso a paso	38
Figura 31-1 Driver TB6600	38
Figura 32-1 Fuente de poder de un computador	40
Figura 33-1 Sistema Operativo Raspbian	41

Figura 34-1 Sistema Operativo Ubuntu Mate	42
Figura 35-1 Python IDLE	42
Figura 36-1 Arduino IDE.....	43
Figura 1-2 Etapas para la construcción de un sistema de escaneo 3D de miembros superiores.	44
Figura 2-2 Vista General del Sistema de Escáner 3D construido.	45
Figura 3-2 Diagrama Ilustrativo de Diseño de Hardware.	47
Figura 4-2 Figura ilustrativa posición Motor Nema 23.	49
Figura 5-2 Conexión entre Raspberry y NodeMCU a) Diagrama Esquemático b) Vista en 3D	50
Figura 6-2 Colocación tarjeta de expansión.....	52
Figura 7-2 Conexión de diodo láser. a) Diagrama esquemático. b) Vista en 3D.....	52
Figura 8-2 Ubicación de las cámaras	53
Figura 9-2 Geometría del sistema de captura de imágenes.....	53
Figura 10-2 Modelo para triangulación	54
Figura 11-2 Paso de coordenadas rectangulares a coordenadas 3D.....	55
Figura 12-2 Esquema de geometría usado en proceso de caracterización.	56
Figura 13-2 Fotografía proceso de calibración en eje x	56
Figura 14-2 Fotografía para calcular constantes en eje y.....	58
Figura 15-2 Ubicación de Raspberry Pi3 en Sistema de Escaneo.....	60
Figura 16-2 Escritorio de inicio en Ubuntu Mate para Raspberry	61
Figura 17-2 Aspecto de GUI desarrollada	63
Figura 18-2 Programa VNC Viewer	64
Figura 19-2 Vista de GUI desarrollada desde Windows por medio de VNC	64
Figura 20-2 Diagrama de cuerpo libre de sistema de captura.....	70
Figura 21-2 Diagrama ejemplo tren de engranajes	73
Figura 22-2 Tren de engranajes adquirido	74
Figura 23-2 Tren de engranajes dibujado en Solidworks.....	74
Figura 24-2 Sistema de captura.....	75
Figura 25-2 Colocación de contrapeso.....	76
Figura 26-2 Diagrama de cuerpo libre de sistema equilibrado	76
Figura 1-3 Importación de fichero PLY a MeshLab.....	80
Figura 2-3 Selección de datos atípicos.....	80
Figura 3-3 Borrado de datos atípicos	81
Figura 4-3 Cálculo de normales a los puntos.....	81
Figura 5-3 Resultado de cálculo de normales a los puntos	82
Figura 6-3 Muestreo de puntos	82
Figura 7-3 Recalculado de normales a los puntos.....	82
Figura 8-3 Resultante de post-procesamiento	83

Figura 9-3 Captura Ingreso de datos Cámara 1 vs Kinect a R.....	90
Figura 10-3 Captura prueba de varianza datos Cámara 1 vs Kinect en R.....	90
Figura 11-3 Resultados prueba T en R para datos Cámara 1 vs Kinect.....	91
Figura 12-3 Captura prueba de varianza datos Cámara 1 vs Kinect en R.....	92
Figura 13-3 Resultados en software Cura Engine a) Material y tiempo estimado b) Vista lateral c) Vista por capas.....	104
Figura 14-3 Resultados en software Repetier Host.....	105

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2 Diagrama de Flujo GUI	65
Gráfico 2-2 Diagrama de Flujo NodeMCU.....	66
Gráfico 3-2 Diagrama de Flujo Calibración Láser	66
Gráfico 4-2 Diagrama de Flujo Captura de Imágenes.....	67
Gráfico 5-2 Diagrama de Flujo Preprocesamiento de Imágenes.....	68
Gráfico 6-2 Diagrama de Flujo Procesamiento de Imágenes	69
Gráfico 1-3 Gráfico de dispersión de medidas obtenidas por Cámaras y Kinect.....	93
Gráfico 2-3 Gráfico de dispersión de error absoluto entre cámaras y dispositivo Kinect.....	95
Gráfico 3-3 Gráfico de dispersión de medidas obtenidas mediante Cámaras y medida real	98
Gráfico 4-3 Gráfico de dispersión del error absoluto según las medidas de la Cámara 1	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Características Kinect	26
Tabla 2-1 Características Ciclop	27
Tabla 3-1 Características Go!Scan 20.....	28
Tabla 4-1 Características Raspberry Pi 3	34
Tabla 5-1 Características PiCamera V1	35
Tabla 6-1 Características NodeMCU	37
Tabla 7-1 Características TB6600.....	39
Tabla 8-1 TB6600 micro-pasos.....	39
Tabla 9-1 TB6600 Control de corriente	40
Tabla 1-2 Características principales de Motor Nema 23	48
Tabla 2-2 Conexiones desarrolladas entre Raspberry Pi3 y NodeMCU	50
Tabla 3-2 Conexiones desarrolladas entre Raspberry Pi3 y Láser	52
Tabla 4-2 Medidas para determinar las relaciones en el eje x.....	57
Tabla 5-2 Medidas para escala en eje y.....	58
Tabla 1-3 Objetivos de desempeño de Escáner 3D	78
Tabla 2-3 Tiempos tomados en adquisición de datos.....	84
Tabla 3-3 Mediciones de tiempo en el preprocesamiento de imágenes	85
Tabla 4-3 Mediciones de tiempo en el procesamiento de imágenes	86
Tabla 5-3 Medidas de diámetro de objeto de calibración según Cámaras y Kinect.....	88
Tabla 6-3 Resultados prueba T para datos Cámara 1 vs Kinect.....	91
Tabla 7-3 Resultados prueba T para datos Cámara 2 vs Kinect.....	92
Tabla 8-3 Cálculo de error absoluto.....	94
Tabla 9-3 Cálculo de error porcentual.....	95
Tabla 10-3 Medidas de diámetro de objeto de calibración según Cámaras y medida real.....	97
Tabla 11-3 Error entre medidas obtenidas por cámaras y medida real	99
Tabla 12-3 Costos de materiales y herramientas.....	101
Tabla 13-3 Costos de equipos	102
Tabla 14-3 Costos de implementación	103
Tabla 15-3 Costo total.....	103
Tabla 16-3 Costo estimado prototipado via impresión 3D en software Cura Engine	104
Tabla 17-3 Costo estimado de prototipado via impresión 3D en software Repetier Host	105

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se desarrolló un prototipo de escáner 3D con el propósito de realizar la digitalización tridimensional de la sección del antebrazo y generar un fichero que puede ser manejado en cualquier programa de diseño CAD para ser mejorado y posteriormente llevado a un proceso de impresión 3D. Durante el desarrollo del trabajo se realizó el diseño y construcción del prototipo basado en visión artificial estéreo binocular; para lo cual se utilizó dos cámaras Pi Camera V1, un diodo láser, un sistema mecánico rotatorio y como núcleo un microcomputador Raspberry Pi3, el mismo que controla el movimiento del sistema mecánico mientras se realiza la adquisición y almacenamiento de imágenes provenientes de las cámaras. Posteriormente, se realiza el procesamiento de dichas imágenes, en el cual se calcula la deformación del haz láser que a su vez representa las coordenadas espaciales del miembro escaneado medidas en pixeles, motivo por el cual fue necesario realizar un proceso de escalamiento para trasladarlas a medidas reales. Las coordenadas obtenidas son agrupadas dentro de una nube de puntos en tres dimensiones y almacenadas directamente como archivo de polígonos (PLY). Las medidas resultantes fueron llevadas a un proceso de contraste con aquellas obtenidas por medio de un dispositivo Kinect realizándose 30 pruebas encontrando errores porcentuales comprendidos entre 1% y 2%. Además, el tiempo promedio que toma el proceso es 25 minutos, permitiendo así disminuir el tiempo que toma el dimensionamiento de prótesis ortopédicas pasivas altamente personalizables para esta región del cuerpo. La pérdida de datos o la generación de datos erróneos se evita al proporcionar un sistema de aislamiento lumínico, ya que el exceso de luz en el ambiente genera un efecto de absorción del haz láser; por tanto, se construyó una cabina de aislamiento. Se recomienda leer atentamente el manual de instrucciones.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA>, <ESCANER 3D>, <VISIÓN ARTIFICIAL>, <PRÓTESIS ORTOPÉDICAS PASIVAS>, <NUBE DE PUNTOS>, <ARCHIVO DE POLÍGONOS (PLY)>

SUMMARY

In the present project a prototype of 3D scanner was developed with the purpose to realize the three-dimensional digitization of the section of the forearm and to generate a file that can be handled in any program of design CAD to be improved and later taken to a process of 3d print. During the development of the work was carried out the design and construction of the prototype based on binocular stereo artificial vision; for which there were used two cameras Pi Camera V1, a laser diode, a rotary mechanical system and as core a Raspberry Pi3 microcomputer, which controls the movement of the mechanical system while performing the acquisition and storage of images sent from the cameras. Subsequently, the image processing is performed, in which the laser beam deformation is calculated which in turn represent the spatial coordinates of the scanned member measured in pixels, which is why it was necessary to perform a scaling process to transfer them to actual measurements. The coordinates obtained are grouped into a three-dimensional point cloud and stored directly as a polygon (PLY) file. The resulting measurements were carried out in a process of contrast with those obtained by means of a Kinect device, 30 test were performed, with errors ranging from 1% to 2%. In addition, the average time taken by the process is 25 minutes, allowing to reduce the time taken for dimensioning of highly customizable passive orthopedic prostheses for this region of the body. The loss of data or the generation of erroneous data is avoided to provide a system of light isolation, since the excess of light in the environment generates an effect of absorption of the laser beam; therefore, an isolation booth was built. It is recommended to read the instruction manual carefully.

Key words: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <ENGINEERING AND ELECTRONIC TECHNOLOGY>, <3D SCAN>, <ARTIFICIAL VISION>, <PASSIVE ORTHOPEDIC PROSTHESIS>, <POINT CLOUD>, <POLYGON ARCHIVE>

INTRODUCCIÓN

La idea para el diseño y construcción del prototipo propuesto en este trabajo nace al fusionar tres conceptos; el primero trata sobre los escáneres 3D que cada día son más accesibles, el segundo sobre el proceso de la fabricación de prótesis y el impacto psicológico de las mismas en los pacientes, y el tercero acerca de la implementación de la tecnología para mejorar la calidad de vida de los seres humanos.

En la actualidad emergen servicios de construcción de férulas impresas, cuyo diseño se lo logra mediante la implementación de un escáner 3D; el mismo que a criterio de Smakman (2015, pp.10-12) permitiría o podría contribuir a una enorme cantidad de aplicaciones en el campo médico, en especial para el desarrollo de órtesis y prótesis a medida.

Para lograr una mejor captura de datos, según Fitzpatrick et al. (2017, pp.1-3) se debe buscar una posición óptima del brazo, tal como es la posición de lanzador de dardo. Cabe recalcar que el uso de esta tecnología para la adquisición de información es de suma importancia, ya que Kelly et al (2015, pp. 7-9) enfatizan que la correcta captura de datos anatómicos es vital para generar prótesis a medida.

Además, se debe considerar que la fabricación casera de prótesis se multiplica cada año debido a la introducción de la impresora 3D al mercado y existen varias empresas ofreciendo este tipo de servicios. Lamentablemente estos avances no se presentan en nuestro entorno debido a diferentes limitantes.

La concepción del prototipo presentado en el documento se basa en un amplio estudio teórico y toma en cuenta conceptos y bases teóricas desarrolladas y tiene como propósito facilitar el proceso de medición de los miembros superiores de usuarios que requieran la construcción de una prótesis a medida o “personalizada”, además que permite ahorrar tiempo en cuanto al diseño de la misma.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Para la implementación de este trabajo de titulación, es importante tomar en cuenta detalles como los que recomienda:

Yanez (2014, pp. 93) Se recomienda usar webcams con buena resolución para tener tomas de mejor calidad que permitirán mayor exactitud a la hora del procesamiento de las imágenes.

Guamán & Sosa (2013, pp.92): Se recomienda que luego de la realización del proceso de digitalización se dé un tiempo de reposo al sistema, debido a que se produce calentamiento de los actuadores.

En el presente trabajo de titulación se realiza la implementación de un escáner 3D para la reconstrucción de modelos digitales de las zonas que se encuentra localizadas debajo del codo de una persona, enfocándose en la sección del antebrazo. Para la realización de este trabajo, debemos analizar los fundamentos teóricos que lo sustentan.

Dentro del campo de la visión artificial, el uso de sistemas de visión estéreo involucra la necesidad de realizar un proceso de calibración de las cámaras, en el cual se determinan los parámetros intrínsecos (características internas, ópticas y geométricas) y extrínsecos (proceso mediante el cual se determina la posición 3D del marco de la cámara con respecto a un sistema de coordenadas previamente definido).

Para dicho proceso existen varias técnicas y algoritmos presentes en la literatura, los que pueden distinguirse según las siguientes clasificaciones:

- Según el tipo de patrón a utilizar:
 - Coplanario

- No Coplanario
- Según la técnica matemática usada:
 - Lineal
- Por medio de algoritmos de optimización

En cuanto al proceso de reconstrucción digital, el mismo es entendido como el conjunto de algoritmos matemáticos que nos permiten calcular puntos en el espacio tridimensional $P(X, Y, Z)$ en base a la información obtenida gracias a dos cámaras ubicadas una a la derecha y otra a la izquierda; dicha información en conjunto con los datos obtenidos en el proceso de calibración nos asegura un mayor éxito de este proceso.

Una prótesis es un aparato diseñado con el fin de sustituir una parte faltante del cuerpo humano; la misma que debe estar construida en base a las especificaciones y necesidades del paciente, de modo que mejore significativamente su calidad de vida.

Actualmente, con la incursión de la tecnología en el área de la Medicina; se han presentado grandes avances tales como el desarrollo de nuevos materiales, inclusión de mecanismos, actuadores, sistemas de transmisión, dispositivos de adquisición de señales; entre otros. Uno de los últimos avances es el desarrollo de modelos tridimensionales de las zonas comprometidas para su posterior reproducción e incluso personalización de las mismas.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Con la implementación de este prototipo de escáner 3D se pretende presentar una propuesta de tecnología para reconstrucción digital en 3D y prototipado de prótesis ortopédicas pasivas; como alternativa a los sistemas tradicionales que son usados actualmente.

El sistema que se emplea para el registro de imágenes digitales es del tipo estereoscópico, mediante el cual se pretende mayor cantidad de datos del modelo escaneado, permitiendo así eliminar oclusiones, a la vez que se aumenta la precisión del sistema.

El procesamiento de las imágenes se realiza a través de un microcomputador, el cual posee un reducido tamaño físico, potente capacidad de procesamiento y de trabajo bajo software libre,

evitando de esta forma problemas relacionados con la adquisición de licencias, lo que, además, permite reducir costos en gran medida.

Otras tareas asignadas al microcomputador son: interpretar los datos recogidos por los sensores CCD de las cámaras en el proceso de registro de imágenes, generar modelos 3D a partir de la información recibida y comunicarse con un microcontrolador para gestionar el funcionamiento de los actuadores del sistema, tales como: el motor paso a paso y el láser.

El sistema de visión estéreo se construye con dos cámaras, las cuales son de dimensiones y peso reducido, ya que facilita su movimiento; además se optó por una alternativa que presente existencia de gran soporte e información en la web. La implementación de este tipo de sistema aporta la reducción de la incidencia de oclusiones en nuestra escena, las mismas que se pueden presentar en sistemas que ocupan solamente una cámara para la captura de imágenes.

En cuanto al sistema mecánico, podemos decir que el mismo se ajusta a las exigencias de funcionamiento del escáner 3D, y se encuentra conformado por un sistema de engranes conectado a un motor paso a paso, el mismo que es manejado por el microcontrolador a través de su respectivo driver; permitiendo la realización de un movimiento estable y continuo que asegura un correcto registro de imágenes desde diversos puntos de vista.

Una vez que se ha desarrollado la implementación y validación de este trabajo de titulación, se puede proponer fácilmente su migración hacia aplicaciones de mayor envergadura; como la realización de modelos 3D de extremidades inferiores e incluso de cuerpo completo.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

- Desarrollar un prototipo de Escáner 3D empleando Visión Artificial Estéreo, orientado a la reconstrucción digital del antebrazo de una persona, para posteriormente ser implementado, obteniendo un modelo capaz de ser empleado para construcción de prótesis.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la técnica más viable en cuanto a la captura de las imágenes a procesar.
- Construir un prototipo de escáner 3D, el cual nos permita adquirir imágenes de las partes del cuerpo a ser reconstruidas digitalmente.
- Montar un sistema mecánico que permita reducir el número de cámaras requerido para el proceso de escaneado.
- Seleccionar el mejor algoritmo encaminado a la reconstrucción y generación de curvas y superficies en la etapa de reconstrucción 3D.
- Proponer una herramienta de bajo costo útil para el Modelado y Prototipado de Prótesis Ortopédicas Pasivas.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Visión Artificial

1.1.1. Definición

Sucar y Gómez (2011, p.1) definen la visión artificial como el campo de estudio de los procesos involucrados en la visión humana, para así poder entenderlos y crear máquinas o aparatos con la capacidad de recrear dichos procesos.

1.1.2. Función

Las principales funciones de un sistema de visión artificial son:

- Obtener información de escenas mediante la proyección de imágenes en el elemento sensor.
- Realizar el procesamiento de las imágenes capturadas
- Realizar el análisis de la información encontrada en dicha imagen.

Para la realización de dichas funciones el sistema requiere de un elemento sensor, el cual es imprescindible y su comportamiento viene condicionado por la incidencia de iluminación y el dispositivo digitalizador de las imágenes.

Una vez que la imagen ha sido capturada y digitalizada se puede proceder al tratamiento de la misma, realizando sobre ellas funciones de filtrado, procesamiento y extracción de características;

dichas operaciones se pueden realizar con la ayuda de softwares dedicados a esta tarea o que contienen funciones idóneas para estas tareas.

En la siguiente figura, se puede observar los principales elementos de un sistema de visión artificial:

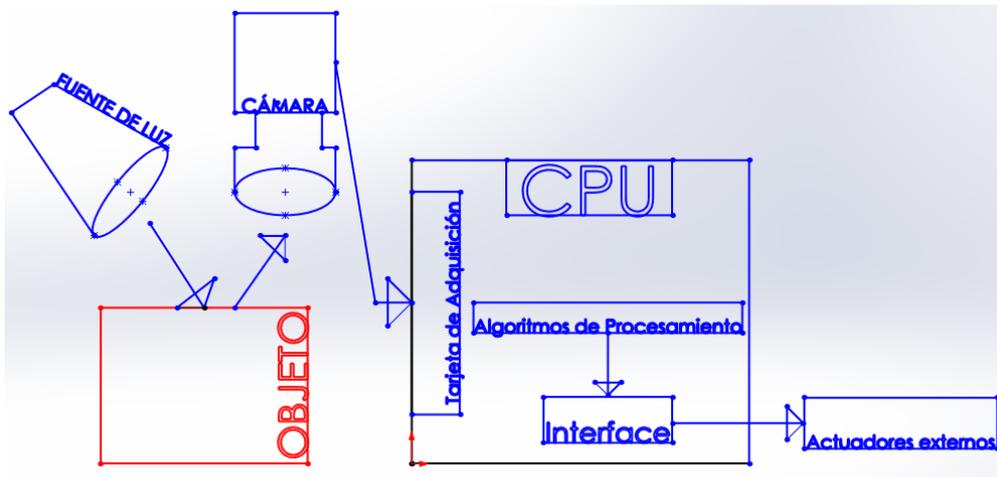


Figura 1-1 Componentes Sistema de Visión Artificial

Fuente: <http://goo.gl/tASwtY>

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

1.1.3. Partes del sistema

1.1.3.1. Sensor de imagen

Un sensor de imagen es un elemento de una cámara, el cual es sensible a la luz y tiene como tarea captar la incidencia de luz en la escena con el objetivo de convertir esa señal óptica en una de tipo eléctrica. El mismo puede estar construido en base a tecnología analógica o digital. A continuación, se describe brevemente los tipos de sensores existentes

- **Sensor CCD.** Se construye gracias a tecnología digital, es el más usado debido a que es el más económico, presenta un buen nivel de sensibilidad a la luz y a la vez presenta un bajo nivel de deformación geométrica de la imagen. Su funcionamiento se basa en el uso de elementos semiconductores fotosensibles dispuestos en forma de un arreglo bidimensional, en el cual la energía de la luz incidente se transforma en energía eléctrica.

- **Sensor CMOS.** Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico, se asemeja al sensor CCD en la disposición de sus elementos constitutivos, con la diferencia de que en este se incorpora un amplificador de la señal eléctrica en cada elemento de la matriz.

En la Figura 2-1, se presentan los distintos tipos de sensores:

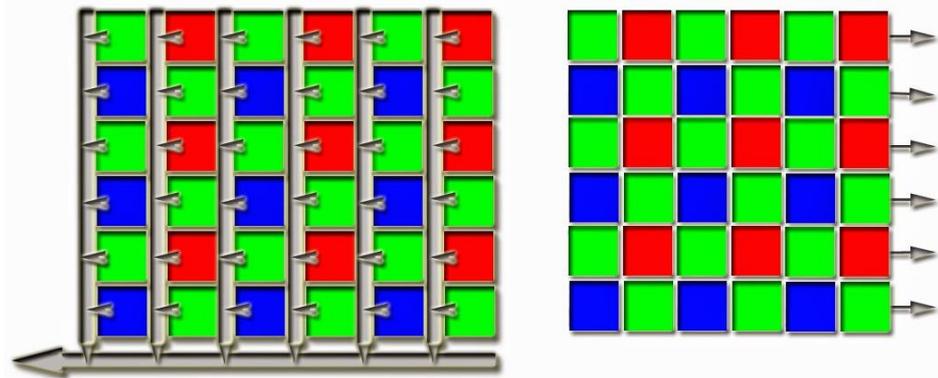


Figura 2-1 Tipos de sensores: CCD y CMOS

Fuente: <https://goo.gl/ydO9vg>

1.1.3.2. Fuentes de iluminación

Es un parámetro muy importante en los sistemas de visión artificial. Un resultado exitoso depende mucho de la calidad de la iluminación presente; si la misma es de buena calidad, se reduce la cantidad de tareas a efectuar durante el procesamiento de las imágenes y por ende se reducirá el gasto computacional de los algoritmos y el tiempo de ejecución de los mismos.

Un sistema de iluminación debe tener la capacidad de adaptarse a los objetos a evaluar, y así eliminar las zonas más oscuras de la región de interés en nuestra escena. Por dichas razones, es sumamente importante realizar una buena selección del sistema a utilizar, para lo cual se debe considerar:

- Entorno en el que se efectuara la operación del sistema
- Superficies, Volumen y Tamaño del Objeto
- Tipo de fuente de luz (led, fluorescente, halógena, láser, etc.).

1.1.4. Tipos de información

1.1.4.1. Información bidimensional

Las imágenes que se procesan con este método permiten trabajar en el espacio bidimensional, con el objetivo de obtener información sobre características tales como: texturas, colores, bordes, etc., no obstante, al momento de requerir información sobre la posición espacial de los objetos en el campo de visión no es posible obtenerla, generando la necesidad de otro de método de visión.

1.1.4.2. Información tridimensional

La información tridimensional se obtiene mediante técnicas que permiten determinar la profundidad o información espacial de los objetos; entre ellas encontramos el análisis bifocal; el mismo que se basa en un sistema constituido por dos cámaras que toman dos imágenes desde distintas perspectivas del mismo objeto.

La geometría producida por este sistema se conoce como geometría epipolar. De esta manera, las líneas de barrido del par son líneas epipolares. Una línea epipolar se genera cuando los dos ejes de las cámaras de un sistema estereoscópico se encuentran paralelos entre sí y perpendiculares a la base. Tal como se ilustra en la Figura 3-1.

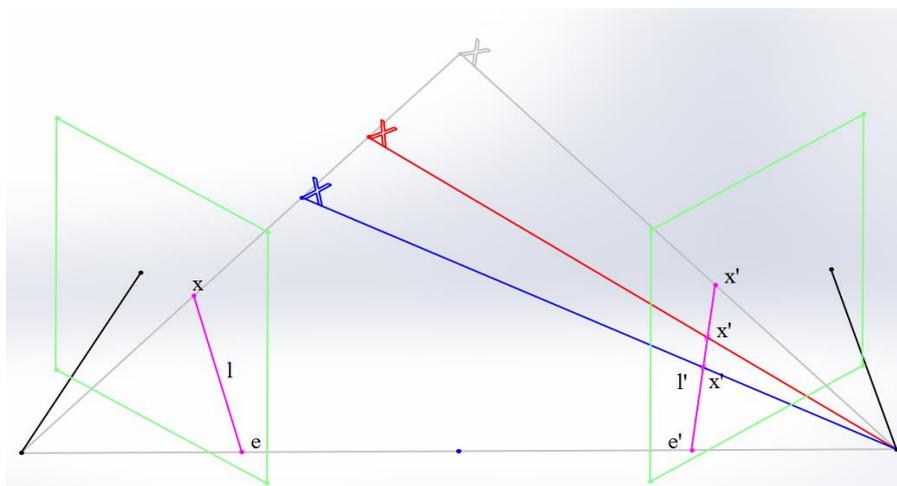


Figura 3-1 Geometría Epipolar

Fuente: <http://goo.gl/4uliOX>

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

1.1.5. Etapas de un sistema de visión artificial

Las etapas de un sistema de visión artificial se pueden enlistar como:

- Adquisición de Imágenes
- Pre procesamiento de Imágenes
- Procesamiento de Imágenes
- Segmentación
- Detección de bordes
- Extracción de características
- Reconocimiento del objeto o región de interés
- Interpretación de la escena

A continuación, se describirá brevemente cada una de ellas:

1.1.5.1. Adquisición de imágenes

Acción mediante la cual se obtiene una imagen visual en dos dimensiones en un formato digital para ser analizada mediante un software, para ello, es necesario disponer de un medio que permita digitalizar la información presente en un sensor de imagen, pudiendo ser una cámara fotográfica de mano, tal como se presenta en la Figura 4-1.



Figura 4-1 Ejemplo adquisición de imagen

Fuente: <https://goo.gl/oZvNwt>

1.1.5.2. Pre procesamiento de imágenes

En esta sección se realizan acciones básicas que nos ayudan a preparar la imagen antes de realizar el respectivo tratamiento de la misma con algoritmos y operaciones; dentro de las acciones básicas que se pueden realizar se tiene principalmente la reducción de ruido y el filtrado de imágenes.

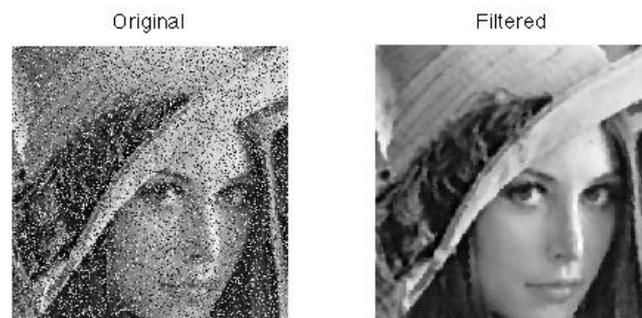


Figura 5-1 Ejemplo preprocesamiento

Fuente: <https://goo.gl/sb0lkz>

1.1.5.3. Procesamiento de imágenes

Serie de operaciones y transformaciones sobre la imagen con el fin de obtener una vía que permite extraer la información contenida en la misma.

Durante la realización de las operaciones se obtiene una copia de la imagen original, que ha sido modificada gracias a los algoritmos y operaciones efectuados sobre la misma, los cuales pueden incluir:

- Reducción de ruido en la imagen
- Ajuste de brillo y contraste
- Obtención de escala de grises
- Discriminación de regiones no deseadas
- Suavizado
- Realzado

En la Figura 6-1 se ilustra la resultante de la operación de reducción de ruido.

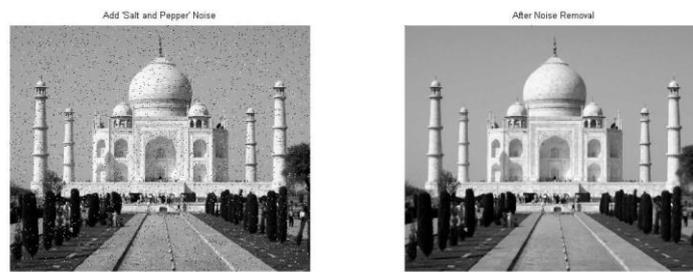


Figura 6-1 Ejemplo reducción de ruido

Fuente: <https://goo.gl/RTHSMF>

1.1.5.4. Segmentación

Realiza la separación de los distintos objetos presentes en la escena y se establecen características que permiten distinguir unos de otros. Esta sección es considerada de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema de visión artificial.

Para la realización de este proceso se presentan básicamente dos opciones:

- Segmentar en base a bordes. - Se determina regiones que demuestran una relación de continuidad entre ellas, analizando principalmente los cambios bruscos del nivel de grises.
- Segmentar en base a propiedades. - Aquí, se determina la existencia de regiones que comparten las mismas características, tales como: nivel de gris, color, textura, etc.

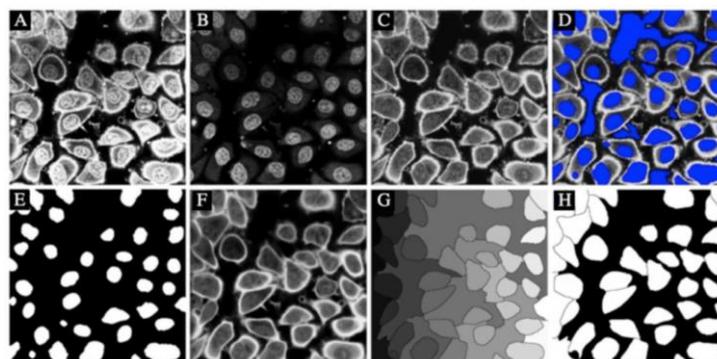


Figura 7-1 Ejemplo de segmentación

Fuente: <https://goo.gl/1bwFb7>

1.1.5.5. Extracción de características

Una vez completado con éxito el proceso de segmentación se procede a extraer las características y propiedades de interés según la aplicación; las mismas que pueden ser, por ejemplo: regiones con bordes definidos, regiones circulares; etc.

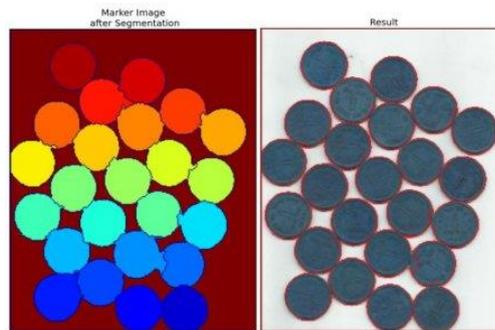


Figura 8-1 Ejemplo de extracción de características

Fuente: <https://goo.gl/ZprNmD>

1.2. Digitalización tridimensional

1.2.1. Definición

Es un proceso que consiste en la generación de un modelo gráfico computacional de un objeto determinado. En dicho modelo se pueden presentar características tales como la textura e incluso el color. El proceso de digitalización tridimensional se puede realizar por medio del uso de:

- Tecnología escáner 3D.
- Sensores láser
- Cámaras web, entre otros.

El resultado de este proceso es la obtención de una nube de puntos, que posteriormente y gracias al uso de un software CAD¹ son recreados generando una representación del modelo requerido.

¹ CAD: Diseño Asistido por Computador

Dentro de los medios más utilizados para este proceso, tenemos el escáner 3D; el mismo que es usado por varios tipos de industrias que buscan la generación de modelos confiables para los siguientes propósitos:

- Prototipaje rápido.
- Reproducción de objetos con un alto nivel de exactitud.
- Realización de simulaciones, entre otros.

En la siguiente figura, se muestra la forma en la que trabaja este sistema de digitalización al trabajar con una escultura:



Figura 9-1 Escaneo 3D Láser de Escultura

Fuente: <https://goo.gl/y9z6rA>

1.2.2. Características

Los principales parámetros que describen a un sistema de digitalización 3D se enlistan a continuación:

- Precisión
- Velocidad
- Resolución
- Seguridad
- Capacidad de captura del objeto

Un sistema de digitalización debe contemplar dichos parámetros de funcionamiento al trabajar con objetos de distintos tamaños y texturas, además, debe garantizar en todo momento que la integridad de dichos objetos se mantenga intacta al finalizar el proceso.

1.2.2.1. Métodos

A pesar de la existencia de varios métodos y sistemas de digitalización 3D, los mismos se pueden agrupar en dos grandes grupos, tal como se detalla a continuación:

Sistema por Contacto. - Fueron los primeros en ser desarrollados, y se basan en los datos obtenidos de la superficie del objeto tratado por medio del contacto físico, el cual se realiza gracias al desplazamiento de una punta sobre la superficie de dicho objeto. Debido al desplazamiento de la punta, es necesario que los objetos a digitalizar posean la robustez necesaria para no verse afectados cuando la misma ejerce acción sobre ellos.



Figura 10-1 Escaner 3D de contacto

Fuente: <https://goo.gl/pa5LIN>

Sistema sin Contacto. - En este tipo de sistemas se usan equipos cuyo principio de funcionamiento radica en la emisión de energía (luz, sonido) para la obtención de la información espacial del objeto. Su principal ventaja es la rapidez en el proceso de adquisición de datos.

Los sistemas sin contacto pueden clasificarse en técnicas activas y pasivas, las mismas que se detallan a continuación:

- **Técnicas Activas.** - Se realiza una intervención sobre la escena al incluir la proyección de una fuente de luz específica para la obtención de las coordenadas tridimensionales.

Este tipo de técnicas, a su vez puede clasificarse en:

- Sistemas ópticos. - Su principal característica es la presencia de un emisor de luz y un receptor; con los cuales se genera un triángulo al conocer las orientaciones del haz emitido, del recibido y la profundidad del punto examinado.

Existen tres tipos de métodos ópticos, los que se enlistan a continuación:

- Triangulación activa
- Proyección estructurada
- Telemetría

En la Figura 11-1 se presenta un escáner 3D portable o de mano:



Figura 11-1 Escaner 3D portable

Fuente: <https://goo.gl/Is8rKD>

- Sistemas no ópticos. - Este tipo de sistemas usan energía distinta a la luz; y se basan fundamentalmente en la medición del tiempo de vuelo al proyectarse sobre una superficie determinada; los mismos se pueden clasificar en:

- Sistemas basados en ultrasonidos
- Sistemas basados en microondas



Figura 12-1 Imagen 3D a partir de un ultrasonido

Fuente: <https://goo.gl/mORTsh>

1.2.3. Aplicaciones

Las aplicaciones de la digitalización 3D son variadas; a continuación, se enlistan algunas:

- Industria
- Arqueología
- Medicina
- Arquitectura
- Industria del Cine y Entretenimiento

1.2.4. Nube de puntos

En la actualidad existen diferentes sistemas de escaneo 3D los cuales fundamentan sus principios de funcionamiento en técnicas diversas explicadas anteriormente, pero todos requieren la representación del modelo digital de forma visual fácilmente apreciable por el ojo humano, debido a lo anterior, la información espacial obtenida del objeto se expresa mediante puntos con coordenadas tridimensionales, el conjunto de estos puntos es denominado nube de puntos.



Figura 13-1 Estructura representada mediante nube de puntos

Fuente: <https://goo.gl/9NHd5m>

El conjunto de puntos por lo general se puede expresar mediante una matriz de n filas y tres columnas, el número de filas depende de la cantidad de puntos y las columnas hacen referencia a la posición de los puntos en los ejes de coordenadas x, y, z; además la matriz puede contener información de color que le corresponde a cada punto, para lo cual emplea tres columnas adicionales para representar la información en el espacio RGB.

	1	2	3	4	5	6
28	'0.607960'	'0.208713'	'-0.766044'	255	255	255
29	'0.323489'	'0.111054'	'-0.939693'	255	255	255
30	'0.000000'	'0.000000'	'-1000000	255	255	255
31	'0.000000'	'0.000000'	1000000	255	255	255
32	'0.269902'	'0.210073'	'0.939693'	255	255	255
33	'0.507250'	'0.394808'	'0.766044'	255	255	255
34	'0.683416'	'0.531924'	'0.500000'	255	255	255
35	'0.777152'	'0.604881'	'0.173648'	255	255	255
36	'0.777152'	'0.604881'	'-0.173648'	255	255	255
37	'0.683416'	'0.531924'	'-0.500000'	255	255	255
38	'0.507250'	'0.394808'	'-0.766044'	255	255	255
39	'0.269902'	'0.210073'	'-0.939693'	255	255	255
40	'0.000000'	'0.000000'	'-1000000	255	255	255
41	'0.000000'	'0.000000'	1000000	255	255	255
42	'0.187067'	'0.286328'	'0.939693'	255	255	255
43	'0.351571'	'0.538120'	'0.766044'	255	255	255
44	'0.473671'	'0.725007'	'0.500000'	255	255	255
45	'0.538639'	'0.824448'	'0.173648'	255	255	255

Figura 14-1 Matriz de nube de puntos leída en Matlab

Fuente: Lema, H. Martínez, P. 2017

1.2.5. Hardware

1.2.5.1. Kinect

Microsoft desarrolló y lanzó al mercado un dispositivo que permite jugar videojuegos sin mandos, mediante la utilización del reconocimiento digital de movimientos del cuerpo humano, debido a que permite trabajar directamente con la nube de puntos. El aparato consta internamente de un proyector y cámara infrarrojos, una cámara RGB, además de un arreglo de micrófonos y un procesador interno.



Figura 15-1 Dispositivo Kinect

Fuente: <https://goo.gl/X7Ss2A>

El sistema activa el proyector infrarrojo para generar una nube de puntos infrarroja la cual es despedida con dirección frontal al dispositivo, dichos puntos chocan con los objetos presentes y son reflejados hacia el emisor, variando el brillo de los mismos dependiendo de la distancia a la que se encuentren los objetos, este proceso es capturado por las cámaras infrarroja y RGB instaladas de forma paralela al emisor infrarrojo. Las imágenes resultantes son procesadas obteniendo información espacial sobre los objetos captados, es decir funciona como un sensor de profundidad.



Figura 16-1 Información de profundidad con Kinect

Fuente: <https://goo.gl/Fvj5Dx>

En cuanto a las especificaciones técnicas, se las puede observar en un cuadro a continuación:

Tabla 1-1 Características Kinect

Características	Descripción
Sensor	Cámara RGB Cámara infrarroja Ajuste de sensor con motor de inclinación
Campo de visión	Horizontal: 57° Vertical: 43° Inclinación física: ±27 Rango de profundidad: 1,2 a 3,5 metros
Flujo de datos	320 x 240 a 16-bits profundidad @ 30fps 640 x 480 32-bits de color @30fps Audio 16-bits @ 16 kHz
Tamaño	24.9 x 6.6 x 6.7 cm
Peso	1.4 kg

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: COMUSOFT, 2010.

1.2.5.2. Ciclop 3D scanner

El Ciclop 3D es un escáner tridimensional open source. Está diseñado para digitalizar un cuerpo sólido con sus características espaciales. El dispositivo consta de dos emisores laser, una cámara web, una tarjeta microcontroladora, un motor y una plataforma rotativa.



Figura 17-1 Escaner Ciclop 3D

Fuente: <https://goo.gl/oHhPJp>

El cuerpo a escanear debe posicionarse en la plataforma rotativa, la cual gira cada cierto ángulo por acción del motor instalado en la parte inferior del mismo, este último es manejado mediante la tarjeta microcontroladora comandada desde el computador, el cual además tiene conectada la cámara web con la que captura las imágenes a procesar, estas se las registra cuando el láser se encuentra encendido y cuando está apagado.

Tabla 2-1 Características Ciclop

Características	Descripción
Precisión	0.5 mm a 5 mm
Área de escaneado	205 x 205 mm
Peso máximo	2 kg
Tiempo de escaneo	3 – 4 minutos aprox.
Volumen de escaneo	Diámetro: 205 mm Alto: 250 mm
Cámara	Logitech c270
Fuente	12V 1.5
Motor	Nema 1.7A 1.8/step
Tipo de luz	Láser

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: 3DPRINT, 2015.

1.2.5.3. Go!Scan 20

El escáner desarrollado por la empresa Creaform3d, es de tipo portable, es decir un usuario lo puede llevar en las manos y girar en torno al objeto que se desea escanear.



Figura 18-1 Go!Scan 20

Fuente: <https://goo.gl/CTH76F>

Este escáner está construido en forma de un joystick, el cual consta con un solo botón que activa los tres proyectores de luz estructurada y la cámara central, la cual capta las imágenes para ser tratadas en el procesador interno del dispositivo y posteriormente enviar la información a través de conexión USB al computador en donde el software desarrollado por la misma empresa reconstruye la nube de puntos casi en tiempo real.

Tabla 3-1 Características Go!Scan 20

Características	Detalles
Precisión	Hasta 0, 100 mm
Exactitud volumétrica	0,300 mm/m
Resolución	0,500 mm
Velocidad de medición	550 000 mediciones por segundo
Fuente de luz	Luz blanca (LED)
Área de escaneado	380 x 380 mm
Distancia de seguridad	400 mm
Profundidad de campo	250 mm
Alcance	0,3 – 3,0 m
Resolución de la textura	De 50 a 150 PPP
Textura de colores	24 bits
Conexión	USB 2.0

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: CREAFORM, 2016.

1.2.6. Software

1.2.6.1. Matlab

El software de computador diseñado para realizar cálculos en el ámbito de la ingeniería posee funciones con las cuales permite leer, modificar, escribir, visualizar y procesar de forma directa nubes de puntos.

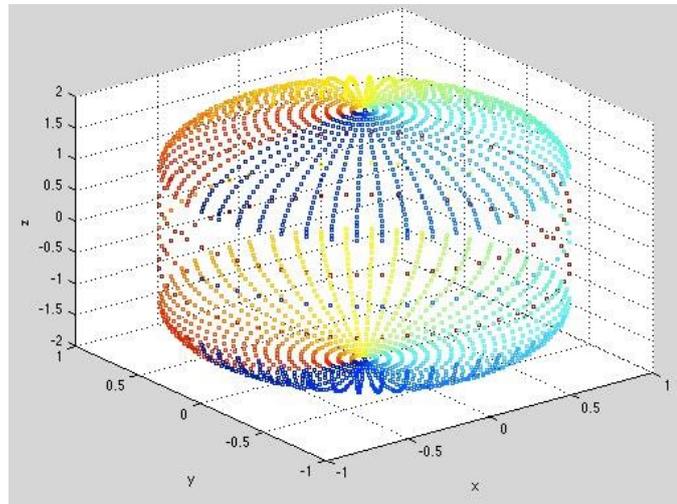


Figura 19-1 Nube de puntos graficada en Matlab

Fuente: <https://goo.gl/5ZeEkY>

En la web existen proyectos empleando Matlab para escanear objetos, el sistema es similar al de Ciclop, es decir posee una base giratoria y un láser proyectado en forma de un haz, las imágenes se procesan en la aplicación desarrollada en Matlab y de esta forma se obtiene la nube de puntos.

1.2.6.2. Horus

Horus es un software libre desarrollado por la empresa BQ para trabajar con el escáner 3d Ciclop, este programa procesa las fotos capturadas provenientes del escáner para generar la nube de puntos con la información obtenida del objeto. El programa cuenta con un proceso de calibración inicial para corregir errores en el proceso de obtención del modelo.

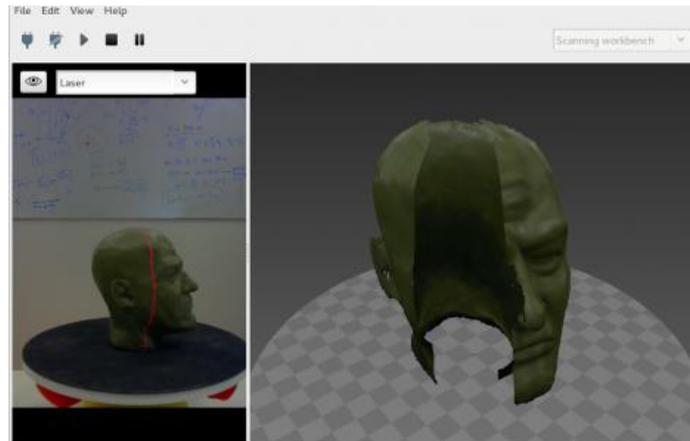


Figura 20-1 Reconstrucción con el software Horus

Fuente: <https://goo.gl/1XAe4Q>

1.2.6.3. *OpenCV*

La librería OpenCV es de código abierto siendo desarrollada con enfoque en el campo de la visión artificial para procesar imágenes y/o videos de tal forma que se pueda obtener información del mundo exterior. Es multiplataforma ya que diferentes sistemas operativos la pueden ejecutar y además cuenta con un buen nivel de soporte por parte de la comunidad desarrolladora.



Figura 21-1 Detección de letras con OpenCV

Fuente: <https://goo.gl/KFmWsb>

1.3. Prótesis ortopédicas

1.3.1. Definición

Sus orígenes se dieron en el antiguo Egipto; las mismas se elaboraban en base a fibras y desde allí hasta la época actual el desarrollo de las mismas ha ido evolucionando principalmente en aspectos estéticos y funcionales; incluyendo en sus versiones más modernas la incorporación de descriptores de fuerza, introducción de microprocesadores e incluso la incursión de la robótica para el control de las mismas.



Figura 22-1 Prótesis ortopédica activa

Fuente: <https://goo.gl/iIt8S9>

Además, los desarrollos en cuanto a la elaboración de materiales han permitido que las prótesis sean cada vez más livianas y presenten mayores niveles de detalle; buscando siempre las mejoras estéticas y funcionales a la par que se brinda la sensación de recuperación de las extremidades comprometidas.

1.3.2. Avances en la tecnología protésica

Los prototipos actuales de prótesis tienen sus orígenes en los modelos desarrollados a partir de mediados del siglo anterior.

En la década de los 90, uno de los principales desafíos de esta tecnología fue el brindar la capacidad de realización de actividades “normales” a personas que habían sufrido amputaciones por debajo de la rodilla, la inclusión de actividades tales como caminar y participar en actividades de recreación y deporte sin demasiado problema fue uno de los requerimientos para los elementos protésicos.



Figura 23-1 Prótesis ortopédica pasiva

Fuente: <https://goo.gl/ZwHIwX>

Sin embargo, la tarea más difícil se encontraba en el desarrollo de prótesis por encima de la rodilla, y más aún de extremidades superiores debido a la latente dificultad de emular el comportamiento físico y funcional de las articulaciones. En la actualidad, gracias a los avances de la tecnología 3D, se han desarrollado un sinnúmero de aplicaciones de la misma en la medicina y la ortopedia como, por ejemplo; el desarrollo de prótesis impresas, tal como se presenta en la Figura 24-1:



Figura 24-1 Prótesis ortopédica pasiva impresa en 3D

Fuente: <https://goo.gl/VlwdSc>

1.3.3. Tipos de prótesis

En cuanto a las prótesis para extremidades superiores se presenta la siguiente clasificación:

1.3.3.1. Según nivel de amputación:

- Desarticulados (hombro, codo, muñeca).
- Prótesis bajo codo.
- Arriba de codo.

1.3.3.2. Según material constitutivo:

- Mecánicas (convencionales).
- Electrónicas.
- Mioeléctricas,
- Híbridas.

1.3.3.3. Según función:

- Pasivas (cosméticas)
- Activas (funcionales)

1.4. Componentes electrónicos del escáner 3D

1.4.1. Microcomputador Raspberry Pi

El microcomputador más empleado y con más soporte actualmente es Raspberry, teniendo varias versiones lanzadas al mercado, siendo actualmente la más potente la versión 3. Las características del dispositivo junto con su precio lo hacen una plataforma muy cómoda para desarrollar diversos proyectos. Permite ejecutar diferentes sistemas operativos, convirtiéndola en un dispositivo versátil.

Integra un potente procesador y un chip de video integrado lo cual permite la conexión con pantallas externas a través de su puerto HDMI. Consta de un puerto ethernet y tecnología Wi-Fi para conectarla a la red.



Figura 25-1 Raspberry Pi 3

Fuente: <https://goo.gl/IOLfuT>

En la Tabla 4-1 se presentan las principales características de esta tarjeta de desarrollo:

Tabla 4-1 Características Raspberry Pi 3

Características	Descripción
Procesador	1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8 CPU
GPU	Broadcom VideoCore IV @ 400 MHz
Memoria RAM	1 GB LPDDR2-900 SDRAM
Almacenamiento	MicroSD
Puerto Ethernet	10/100 Mbps
Wi-Fi	802.11n Wireless LAN
Bluetooth	Bluetooth 4.0
USB	4 puertos
Salida de Video	Full HDMI
Salida de Audio	3.5 mm jack
GPIO	40 pines
Puerto para cámara	Interfaz cámara CSI

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: RaspberryPi, 2016.

1.4.2. Cámaras digitales Raspberry Pi Camera

La Pi Camera es un sensor de imagen de peso y tamaño reducidos, el cual se emplea en la captura de fotografías del mundo exterior, las cuales son enviadas a la microcomputadora mediante un cable plano y un puerto CSI. Este tipo de cámara es controlada por la Raspberry Pi mediante la programación de un script en lenguaje Python, permitiendo la configuración de diferentes parámetros de la misma.

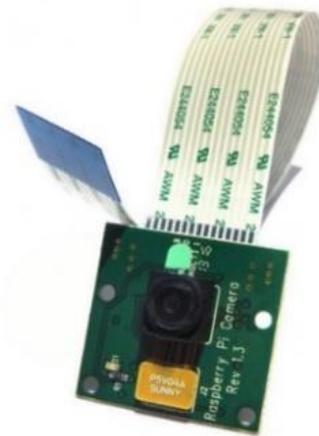


Figura 26-1 Raspberry Pi Camera

Fuente: <https://goo.gl/EShMXA>

En la Tabla 5-1 se presentan las características del módulo PiCamera V1:

Tabla 5-1 Características PiCamera V1

Características	Descripción
Sensor	Omnivison 5647
Resolución	5 MP
Modos de video	1080p@30fps, 729p@60fps, 640x480p
Tamaño	20x25x9 mm
Peso	3 g

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: Pi Supply, 2016. (Raspberry Pi Camera Board v1.3 5mp.)

1.4.3. Módulo multicámara para Raspberry Pi

El módulo multicámara es un multiplexor que permite conectar hasta cuatro cámaras al mismo puerto de la Raspberry Pi, para acceder a las mismas requiere la activación de los pines GPIO de la microcomputadora y la comunicación se establece con una sola cámara a la vez; tal como se presenta en la Figura 26-1.

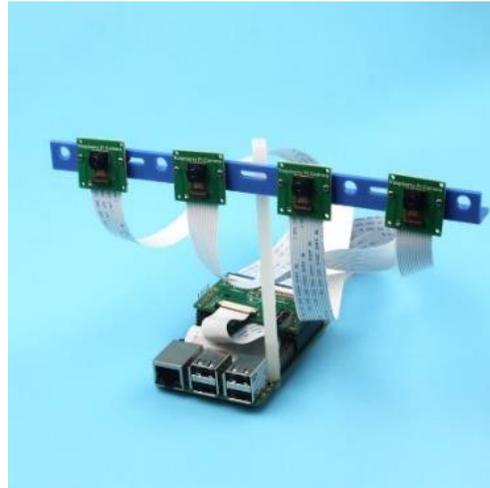


Figura 27-1 Sistema Multicámara

Fuente: <https://goo.gl/kBxHtW>

1.4.4. Láser

Un láser es un dispositivo capaz de generar radiación infrarroja, la cual se presenta en forma de un haz visible y sus longitudes de onda se encuentran aproximadamente en 650 nm. Este tipo de iluminación se usa para la conformación de patrones o líneas que serán usadas en el proceso de triangulación de imágenes.

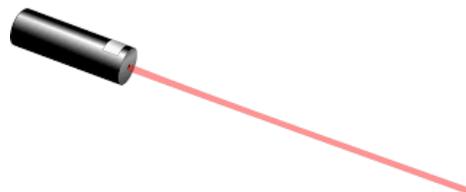


Figura 28- 1 Láser

Fuente: <https://goo.gl/y9z6rA>

1.4.5. Tarjeta de desarrollo NodeMcu

La tarjeta de desarrollo NodeMcu es similar a un Arduino, consta de pines para sus entradas y salidas, soporta algunos protocolos de comunicación, y es programable en la IDE de Arduino. La alimentación del sistema se lo realiza a través de un cable microUSB, aunque también cuenta con un pin de entrada dedicado para el voltaje externo de alimentación de 5V.



Figura 29-1 Tarjeta NodeMCU

Fuente: <https://goo.gl/uiD2bU>

Esta tarjeta permite controlar distintos dispositivos mediante la activación sencilla de sus entradas, facilitando de esta forma el proceso de control, además de otorgar sencillez al sistema. Está construida con un microcontrolador ESP8266, el cual funciona a 3.3V facilitando la conexión directa con los pines de salida de la Raspberry, además funciona a 80 MHz lo que permite una rápida ejecución de las órdenes provenientes de la microcomputadora. En la Tabla 6-1 se presenta las características de la tarjeta NodeMCU.

Tabla 6-1 Características NodeMCU

Características	Descripción
Velocidad	80 MHz
Procesador	32 bits
Protocolo Wi-Fi	802.11 b/g/n
Voltaje de alimentación	5 V
Voltaje de operación	3.3 V
GPIO digital	10 pines
GPIO analógico	1 pin
Comunicaciones	SPI, UART, SDIO 2.0

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: Node MCU Features, 2014.

1.4.6. Motor paso a paso

La característica principal del motor paso a paso es su elevada precisión en cuanto a rotación, esto se logra debido a que posee generalmente de cuatro a seis entradas, las cuales al ser activadas en una secuencia determinada generan los denominados pasos, cada uno de estos representa un desplazamiento angular con un determinado valor en grados. Un ejemplo a presentar son los motores con 200 pasos por revolución, esto quiere decir que su eje gira una vuelta completa luego de 200 pulsos enviados, es decir, por cada pulso de movimiento realiza un desplazamiento de 1.8° .



Figura 30-1 Motor paso a paso

Fuente: <https://goo.gl/PbOqk8>

1.4.7. Driver de motor TB6600

La parte de control de un motor lo ejecuta una tarjeta microcontroladora, no obstante, se requiere una etapa de potencia debido a la energía demandada por el mecanismo, para lograr moverlo se emplea el driver TB6600, el cual posee entradas digitales opto-aisladas por seguridad, las cuales pertenecen a la parte de control, y salidas de fuerza, encargadas de suministrar corriente a las bobinas del motor.



Figura 31-1 Driver TB6600

Fuente: <https://goo.gl/CePFwP>

El dispositivo además incorpora un grupo de seis interruptores, los primeros tres cuales permiten modificar la resolución del movimiento del motor, es decir modificar el número de pulsos requeridos para describir una vuelta completa, y los tres restantes tiene la función de controlar la corriente máxima entregada al motor.

Tabla 7-1 Características TB6600

Características	Descripción
Voltaje de alimentación	9 – 42 V
Corriente de entrada	0 – 5 A
Corriente de salida	0.5 – 4 A
Potencia máxima	160 W
Peso	0.2 kg
Dimensiones	96*56*33 mm

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: Arduino, 2016.

Los interruptores para configurar la resolución de los pasos por vuelta o conocidos generalmente micro-pasos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 8-1 TB6600 micro-pasos

Micro-Paso	Pulso/Rev	S1	S2	S3
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/A	400	ON	OFF	ON
2/B	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: Arduino, 2016.

Los interruptores para configurar la corriente máxima que suministrará al motor pueden ser configurados de la forma en la que se presenta en la Tabla 9-1:

Tabla 9-1 TB6600 Control de corriente

Corriente (A)	Corriente Pico (A)	S1	S2	S3
0.5	0.7	ON	ON	ON
1.0	1.2	ON	OFF	ON
1.5	1.7	ON	ON	OFF
2	2.2	ON	OFF	OFF
2.5	2.7	OFF	ON	ON
2.8	2.9	OFF	OFF	ON
3	3.2	OFF	ON	OFF
3.5	4.0	OFF	OFF	OFF

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: Arduino, 2016.

1.4.8. Fuente de poder

La parte encargada de suministrar la potencia requerida para el funcionamiento del dispositivo es una fuente de poder, la cual transforma la corriente proveniente del suministro eléctrico en voltajes de corriente continua aceptados por los dispositivos electrónicos empleados. Por lo general consta de salidas de 5, 9 y 12 voltios.



Figura 32-1 Fuente de poder de un computador

Fuente: <https://goo.gl/Qw07Sq>

1.5. Software para procesamiento de imágenes

1.5.1. Sistema Operativo Raspbian

El sistema operativo más empleado en el uso de microcomputadoras Raspberry es Raspbian, una adaptación de Debian; es decir software libre y dirigido para desarrolladores. Este sistema operativo es como cualquier otro, consta de un escritorio principal, menús de acceso, posee navegadores web, entre otros programas, la característica más llamativa es el tamaño de dicho sistema, pudiendo ser grabado en una microSD de tamaño desde 8 GB en adelante.

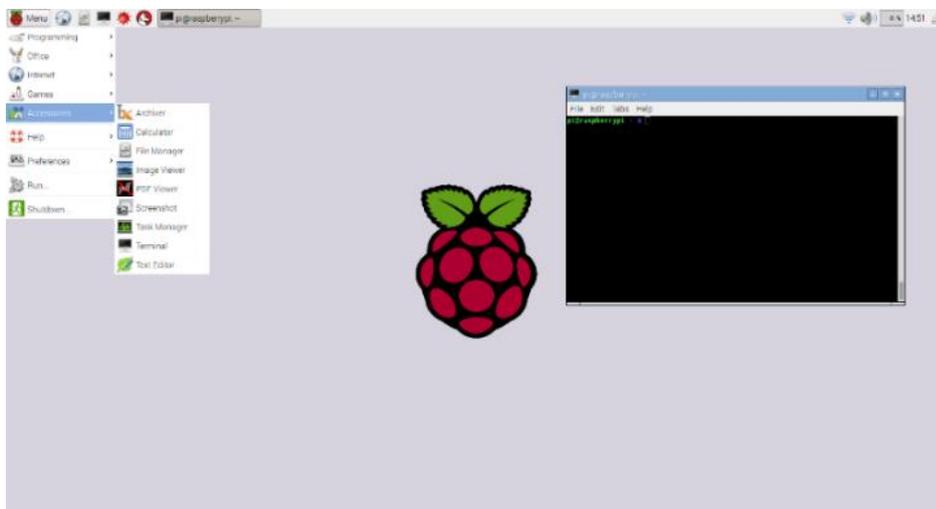


Figura 33-1 Sistema Operativo Raspbian

Fuente: <https://goo.gl/LDvulv>

1.5.2. Sistema Operativo Ubuntu Mate

Ubuntu Mate está desarrollado en base a Ubuntu, lo que lo convierte en un software libre con las capacidades necesarias para desarrollar diversas aplicaciones que requieran un mínimo de características en cuanto a procesamiento. Este sistema operativo es similar a Raspbian, sin embargo; se caracteriza por el mayor número de paquetes y programas soportados.



Figura 34-1 Sistema Operativo Ubuntu Mate

Fuente: <https://goo.gl/xP440m>

1.5.3. Python 2.7

Python es un lenguaje de programación multiplataforma; por tanto, se pueden escribir diversas aplicaciones para ser ejecutadas o compiladas en Raspberry, permitiendo el control de la microcomputadora por completo, siendo el caso más relevante los pines GPIO, con los cuales envía los datos a diferentes periféricos externos.

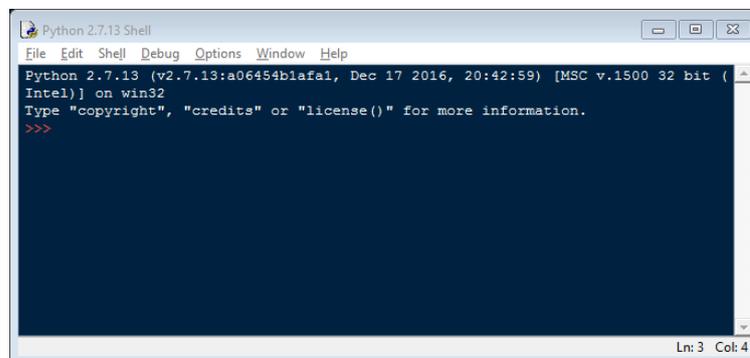


Figura 35-1 Python IDLE

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

1.5.4. Ide Arduino

El entorno para programar el microcontrolador se denomina Arduino IDE; el mismo posibilita ejercer control sobre los diferentes puertos de entradas y salidas, además de los protocolos de comunicación de las diferentes tarjetas de desarrollo soportada. Este software permite la

instalación de diferentes librerías externas lo cual facilita la creación de códigos más potentes, siendo el caso el de la tarjeta microcontroladora NodeMcu, la cual requiere una librería específica originaria de un fabricante diferente al de Arduino.

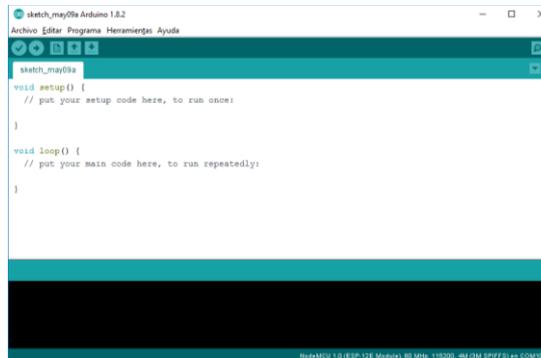


Figura 36-1 Arduino IDE

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del proyecto se aplican los métodos: inductivo, heurístico y experimental; los mismos que se ven distribuidos en las distintas etapas del trabajo. En la siguiente figura se presenta de forma ilustrativa los componentes de cada etapa:

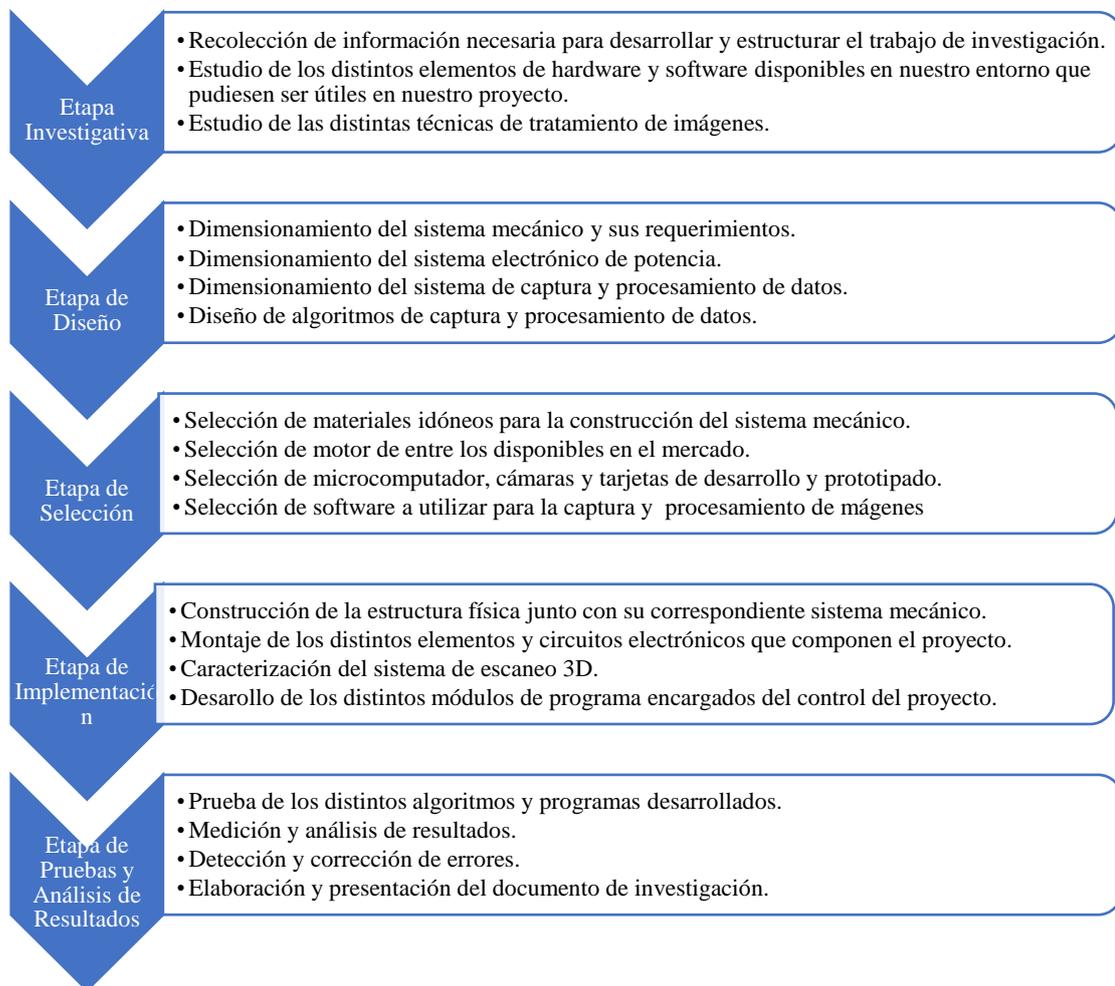


Figura 1-2 Etapas para la construcción de un sistema de escaneo 3D de miembros superiores.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

El método inductivo se aplica en la sección de adquisición de información, debido a que su principal característica es la de facilitar la generalización partiendo de premisas particulares. Entonces, la integración de ideas provenientes de ciencias tales como Tecnología 3D, Visión

Artificial, Electrónica y Medicina posibilita el generar una idea sobre desarrollo de sistemas de modelado y prototipado de prótesis ortopédicas pasivas basados en tecnología 3D y visión artificial.

El método heurístico se usa ampliamente en las secciones de diseño, selección e implementación debido principalmente a que en éste se realiza un estudio del desafío a tratar, se elabora y ejecuta un plan de acción y se analiza los resultados del plan; así, se realiza el dimensionamiento de equipos, la selección de los mismos con dependencia de su disponibilidad en el mercado y su correspondiente instalación, para posteriormente comprobar el rendimiento.

Finalmente, se aplica el método experimental en la sección de pruebas y análisis de resultados; ya que el mismo permite la manipulación de variables según el criterio del investigador y de esta manera faculta la determinación de la existencia de errores en las pruebas realizadas para su posterior corrección.

2.1. Diseño e Implementación

Con base en el estudio teórico, se opta por la construcción de un escáner 3D basado en visión estéreo bifocal; los procedimientos realizados se presentan en este capítulo; entre ellos: los principales requerimientos del mismo, el diseño de hardware, software y mecánica del sistema. En la siguiente figura se presenta de forma ilustrativa el resultado final, indicando la ubicación de cada uno de los elementos utilizados:

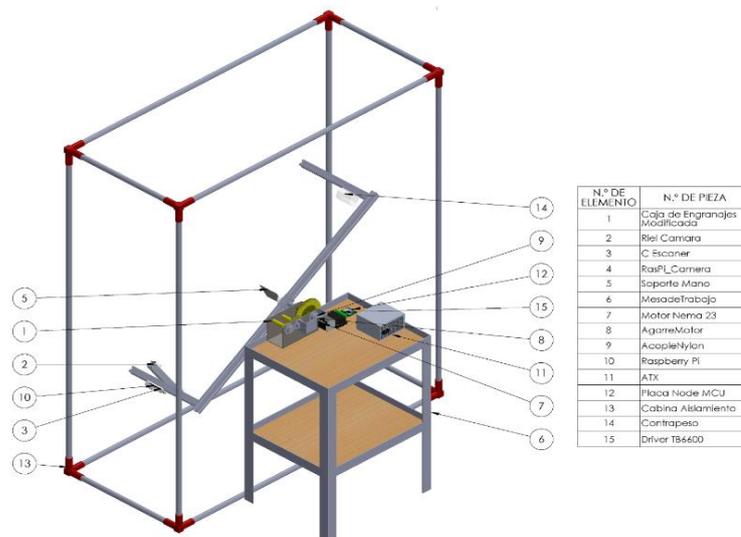


Figura 2-2 Vista General del Sistema de Escáner 3D construido.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.2. Descripción General del Sistema de Escaneo

Para efectuar el proceso de digitalización de la información se usa dos cámaras Pi Camera V1.0 que trabajan en conjunto con un puntero láser que emite una línea horizontal sobre el miembro a digitalizar; inicialmente se realiza la captura y almacenamiento de imágenes en una revolución completa del sistema de cámaras; posteriormente, mediante algoritmos se procede a detectar el haz láser en las capturas realizadas y así determinar los valores de cada punto de la imagen en el plano tridimensional. Una vez que se cuenta con la información en tres dimensiones, se realiza la reconstrucción y tratamiento del modelo gracias a las técnicas de manejo de nubes de puntos.

2.2.1. Principales requerimientos del escáner 3D

Dentro del proceso de construcción se busca principalmente que el equipo sea de bajo costo y a la vez pueda brindar un buen nivel de precisión en la captura y procesamiento de los datos; por lo cual se debe:

- Garantizar un movimiento fluido, controlado y constante de la estructura mecánica.
- Evitar las vibraciones en los sensores de captura de imagen (cámaras) que pudiesen alterar las mediciones efectuadas.
- Usar cámaras de bajo costo con un nivel aceptable de resolución.
- Brindar la posibilidad de ajustar la posición de los sensores de captura del sistema; tanto en cuanto a traslación y rotación.
- Permitir accesibilidad y ligera capacidad de migración del software desarrollado.
- Considerar que el miembro a escanear debe encontrarse lo más centrado posible.

2.3. Hardware

Inicialmente se presenta la Figura 3-2, en la cual se muestra de forma ilustrativa la composición del escáner 3D en cuanto a hardware:

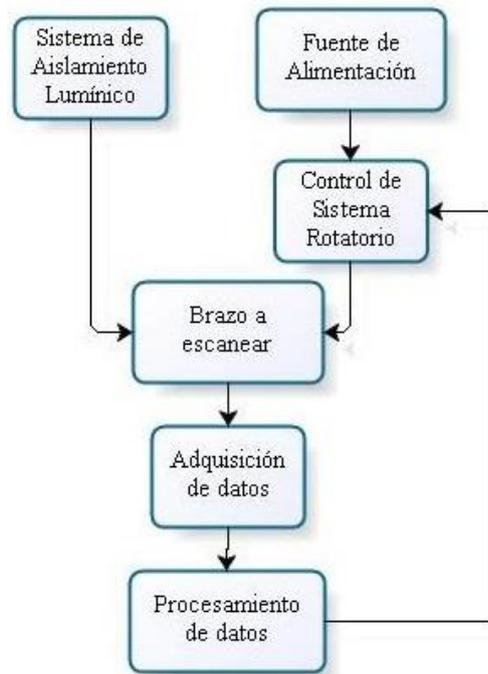


Figura 3-2 Diagrama Ilustrativo de Diseño de Hardware.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.3.1. Sistema de Aislamiento Lumínico

Con el fin de evitar la presencia de perturbaciones en el ámbito lumínico que pudiesen afectar la respuesta del escáner, ya sea por la absorción excesiva del haz de luz láser o por la presencia en demasía de luz en el medio ambiente, se construye un sistema de aislamiento lumínico a modo de cabina, el cual se encontrará cubriendo la sección del sistema rotatorio.

2.3.2. Fuente de Alimentación

Como fuente de alimentación general se selecciona una fuente ATX de computador, la misma que proporcionará tensiones de 12V para la parte de potencia, y 5V para la alimentación del láser, microcomputador y parte de control lógico.

2.3.3. Control de Sistema Rotatorio

Con el fin de obtener un completo control del sistema rotatorio del escáner es necesario realizar la integración de elementos tales como:

- Motor Paso a Paso Nema 23.
- Tarjeta de Desarrollo NodeMCU v3
- Controlador de motor TB6600.

2.3.3.1. Motor paso a paso

La función del motor paso a paso es la de generar un movimiento rotatorio constante y preciso del brazo de aluminio sobre el cual se colocan las cámaras. Se utiliza un motor Nema 23 a causa de la disponibilidad del mismo dentro del mercado. A continuación, presentamos una tabla con las características principales del mismo:

Tabla 1-2 Características principales de Motor Nema 23

Torque de Retención con Energización de Dos Fases [N*m (oz*in) MIN.]	Corriente Nominal [A/fase]	Resistencia del Devanado [Ω/fase]	Inductancia del Devanado [mH/fase]	Inercia del Rotor [[x10 ⁻⁴ kg * m ² (oz * in ²)]	Peso [kg(lbs)]
1.0 (141.6)	3	0.7	3.5	0.21(1.15)	0.65(1.43)

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Fuente: SANYO DENKI, 2009.

Debido a las características del mismo y al régimen de trabajo al que se somete, se procede a acoplar una etapa mecánica de incremento de torque, la misma que será descrita posteriormente con mayor detalle en la sección de mecánica del sistema. En la Figura 4-2, se presenta de forma ilustrativa la posición del motor seleccionado y la etapa mecánica diseñada.

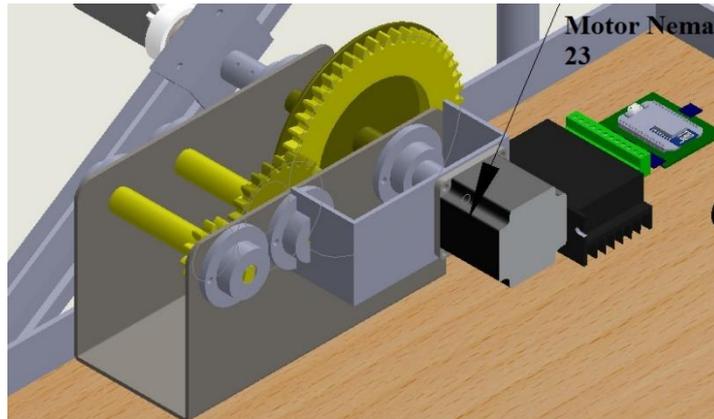


Figura 4-2 Figura ilustrativa posición Motor Nema 23.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.3.3.2. Tarjeta de Desarrollo NodeMCU v3

Esta tarjeta tiene como núcleo un microcontrolador ESP8266, el cual posee como principal característica la capacidad de realizar comunicación inalámbrica vía Wifi, además cuenta con varios pines que pueden ser configurables para manejar periféricos de entrada o de salida. Su tarea es la de coordinar el accionamiento del controlador de motor TB6600 recibiendo señales provenientes del Raspberry Pi.

2.3.3.3. Controlador de motor TB6600

Durante el proceso de selección se determina la idoneidad de este controlador para manejar nuestro motor, con base en sus características de:

- Selección entre varias opciones de capacidad de corriente.
- Entradas opto-aisladas, lo que brinda mayor seguridad al microcontrolador.
- Selección del número de micropasos por paso del motor.
- Capacidad de funcionamiento con tensión TTL 3.3-5V.
- Protección térmica automática.
- Protección contra funcionamiento a bajo voltaje.

- Protección contra sobre corriente.
- Disipador de calor incluido.

2.3.3.4. Comunicación NodeMCU y Raspberry

Para transmitir las órdenes de activación y desactivación del motor desde la Raspberry hacia el NodeMCU se utiliza comunicación vía alámbrica debido a que mediante pruebas se determina que ésta produce menor tiempo de retardo. A continuación, en la Tabla 2-2 se presenta un listado de las conexiones realizadas y los terminales involucrados en las mismas:

Tabla 2-2 Conexiones desarrolladas entre Raspberry Pi3 y NodeMCU

Pin Raspberry PI3	Pin Node MCU
GPIO 13	D5
GPIO 19	D6
GPIO 26	D7
GND	GND

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Además, en la Figura 5-2 se presenta de forma ilustrativa el diagrama esquemático de las conexiones realizadas, realizado en software Fritzing.

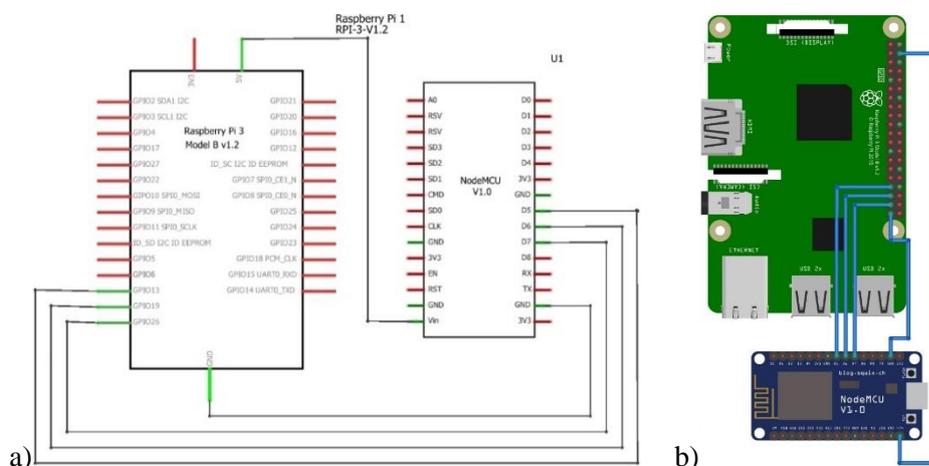


Figura 5-2 Conexión entre Raspberry y NodeMCU a) Diagrama Esquemático b) Vista en 3D

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.3.4. Adquisición de Datos

Dentro de la adquisición de datos del medio se integran los sensores (cámaras), la tarjeta de multiplexación de cámaras y el emisor de luz láser.

2.3.4.1. Cámaras Pi Camera V1

Para desarrollar el proyecto se requiere cámaras que sean pequeñas, económicas y que puedan brindar las prestaciones necesarias en cuanto a la adquisición de imágenes; se determinó que el equipo más idóneo para este propósito es la Pi Camera V1; con un par de las mismas se construye un sistema de visión estéreo binocular; el mismo que se desplaza de forma rotacional alrededor de la extremidad a escanear adquiriendo los datos necesarios para la reconstrucción digital de la información obtenida.

2.3.4.2. Tarjeta Multi Camera Adapter Module for Raspberry Pi

Para la construcción del sistema de visión estéreo necesario se presentan dos caminos a seguir:

- Realizar la integración de dos microcomputadores Raspberry Pi; manejando una cámara individual cada uno y realizar un posterior proceso de sincronización de los mismos.
- Utilizar la tarjeta Multicamera Adapter Module for Raspberry Pi, la misma que nos permite realizar la multiplexación de señales provenientes de varias cámaras y seleccionarlas individualmente según nuestras necesidades.

Finalmente, se opta por la adquisición y uso del módulo multicámara, ya que representa menor complejidad en cuanto a desarrollo de software y permite la conexión de hasta cuatro cámaras. A continuación, se presenta una figura ilustrativa en la que se puede observar la colocación de la tarjeta de expansión:



Figura 6-2 Colocación tarjeta de expansión

Fuente: <https://goo.gl/NK66ih>

2.3.4.3. Láser

La finalidad del láser es la de proyectar un haz de luz que se deforma en dependencia de las características del objeto a escanear facilitando así su reconocimiento y digitalización. En el proyecto se utiliza un láser de 5mW debido a que esta potencia es aún considerada como segura, aunque no se recomienda la exposición directa a hacia los ojos de los seres humanos. En la Tabla 3-2 se presenta un listado de las conexiones realizadas y los terminales involucrados en las mismas:

Tabla 3-2 Conexiones desarrolladas entre Raspberry Pi3 y Láser

Pin Raspberry PI3	Pin Shield Láser
GPIO5	Entrada señal
GND	GND
+5V	+5V
GND	GND

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

En la Figura 7-2, se presenta de forma ilustrativa de la conexión del mismo:

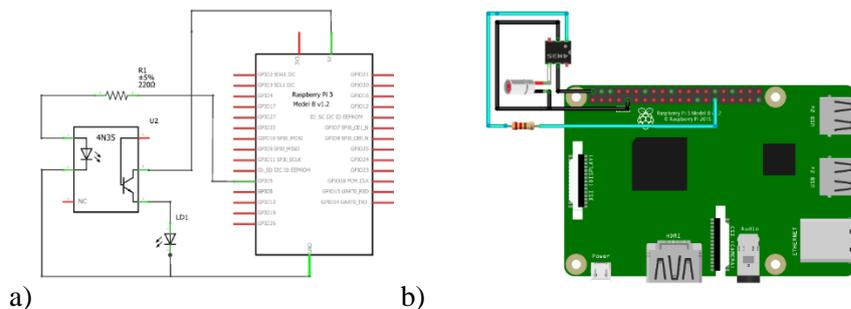


Figura 7-2 Conexión de diodo láser. a) Diagrama esquemático. b) Vista en 3D

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.3.4.4. Colocación de las Cámaras

Mediante pruebas experimentales se determina que la distancia mínima admisible para que el campo de visión de la cámara permita captar la región deseada con una resolución aceptable oscila en aproximadamente 600mm.

Las cámaras se colocan en soportes que permiten regular la orientación y posición de las mismas sobre un riel de aluminio perfilado de aproximadamente 300mm de largo, además sobre dicho riel se ubica el láser en el centro; buscando que la apertura angular entre el foco de las cámaras y el haz laser sea de 30° en total; siendo de 15° por cámara; tal como se ilustra en la Figura 8-2:

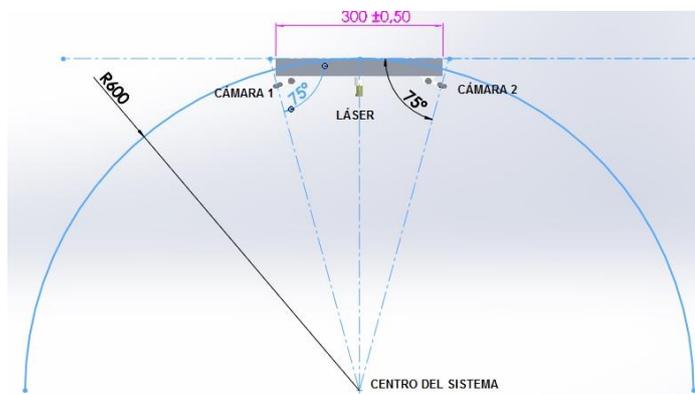


Figura 8-2 Ubicación de las cámaras

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

De esta manera se construye un sistema geométrico conformado por triángulos, tal como se muestra en la siguiente figura:

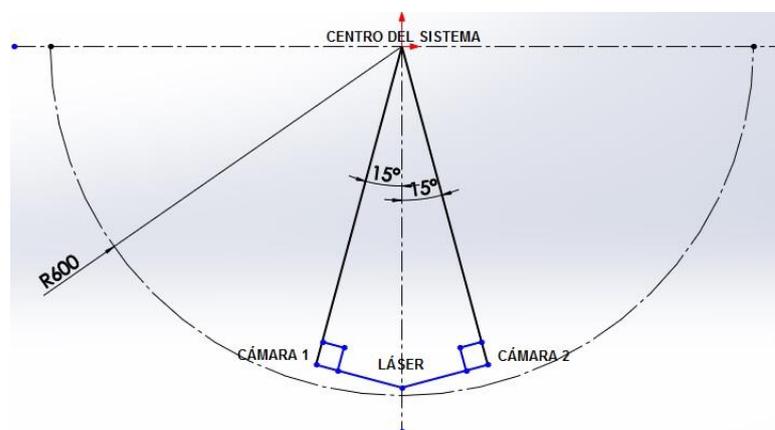


Figura 9-2 Geometría del sistema de captura de imágenes.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.3.4.5. Caracterización del sistema de Escaneo

La caracterización del sistema de escaneo 3D se fundamenta en el modelo de triangulación simple cuyos componentes son: un láser y una cámara, los mismos que pueden representarse geoméricamente de la siguiente manera:

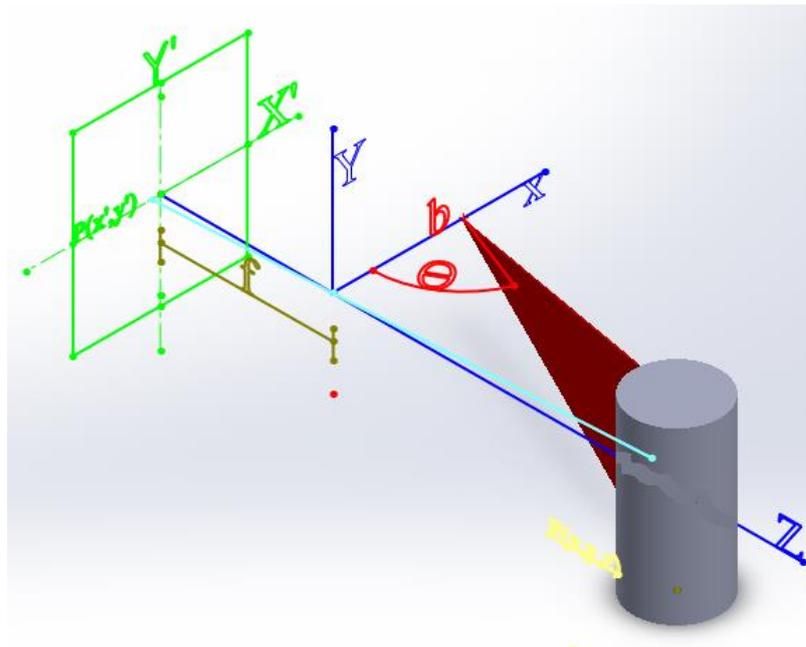


Figura 10-2 Modelo para triangulación

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

En la Figura 10-2 se pueden distinguir las variables:

b : línea base (distancia entre el láser y la cámara)

f : distancia focal (determinada mediante calibración)

θ : ángulo entre el emisor láser y la cámara (en este caso 75°)

$P(x, y, z)$: punto tridimensional

$P(x', y')$: coordenadas rectangulares de punto tridimensional en plano de imagen

Al tratarse de un sistema rotacional, los puntos encontrados en la fotografía, $P(x', y')$ se deben trasladar a coordenadas espaciales $P(x, y, z)$, tomando en cuenta el ángulo de rotación alrededor del eje y ; el mismo que se ilustra en la siguiente figura:

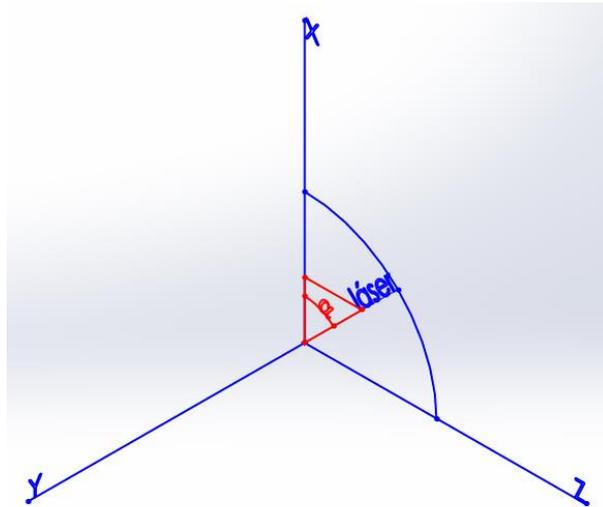


Figura 11-2 Paso de coordenadas rectangulares a coordenadas 3D

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

α : ángulo de rotación del sistema

$$y = y'$$

$$x = x' * \cos(\alpha)$$

$$z = z' * \sin(\alpha)$$

2.3.4.6. Obtención de relaciones existentes entre medidas en pixeles y medidas reales

En esta sección se presenta el proceso de obtención de las relaciones existentes entre los distintos elementos que conforman el sistema de adquisición de datos. Dichas relaciones permiten realizar el cálculo de las coordenadas en tres dimensiones. Inicialmente se realiza el proceso de calibración de cámaras de forma individual, con respecto al sistema; para esto se usa un objeto de calibración, el mismo que puede poseer cualquier forma; sin embargo, con el fin de facilitar esta tarea se usa un objeto que posee características fijas como altura y ancho. Debido a estas razones, se tomó como objeto un pedazo de tubo PVC debido a sus características de simetría y dimensiones bien definidas, obteniendo como resultado un esquema similar al que se ilustra en la Figura 12-2:

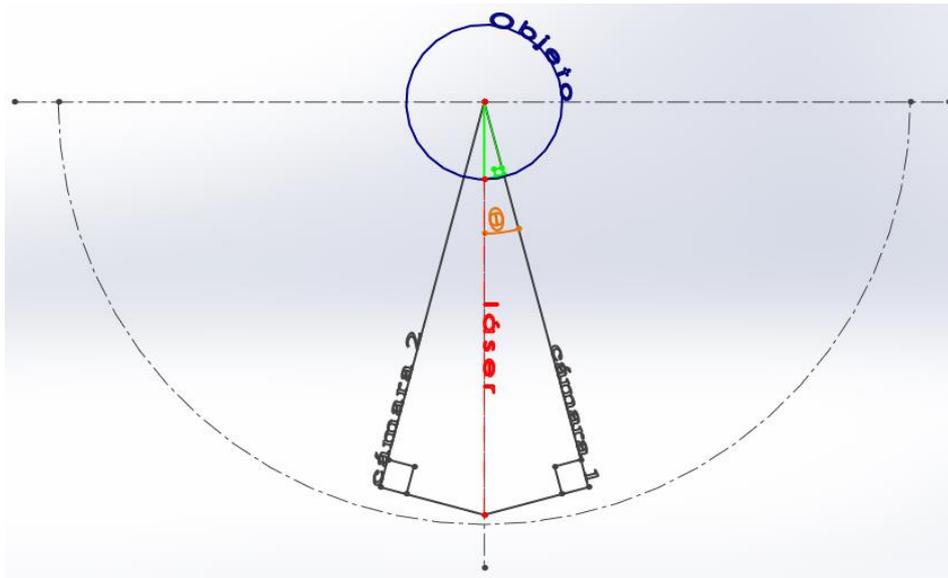


Figura 12-2 Esquema de geometría usado en proceso de caracterización.

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Como primer paso se busca la relación entre las medidas del eje x; para lo cual se ubica el objeto de calibración en la escena tratando de ubicarlo lo más centrado posible, seguidamente se toman fotografías con el haz láser encendido para poder establecer relaciones entre las dimensiones del mundo real y aquellas captadas por las cámaras, dicho proceso se ilustra en la figura presentada a continuación:



Figura 13-2 Fotografía proceso de calibración en eje x

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se designa las variables:

KX_c : medida desde el extremo de la imagen hacia el centro del tubo

KX_e : medida desde el extremo de la imagen hacia el extremo del tubo

KX : diferencia entre KX_e y KX_c

$$KX = KX_c - KX_e$$

Así, se toma 10 muestras de los valores dentro de la fotografía, los cuales se presenta en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2 Medidas para determinar las relaciones en el eje x

Nº Medida	KX_c	KX_e	KX
1	537	311	226
2	538	317	221
3	536	313	223
4	514	312	202
5	538	310	228
6	546	317	229
7	549	321	228
8	548	317	231
9	553	318	235
10	555	319	236
Promedio			225,9

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

$$KX_{promedio} = 225,9 \text{ px}$$

De esta manera, se calcula el valor de la constante de la relación existente entre las medidas tomadas en las fotografías y las medidas del mundo real:

$$r_{tubo} = 55mm$$

$$Escala \text{ en } x = \frac{55mm}{225,9px} = 0.2434mm/px$$

Finalmente, se obtiene la constante para las medidas del eje y. Para lo cual se toma como objeto de calibración una tabla de ajedrez, con las dimensiones definidas del tamaño de sus cuadrados,

y se procede a colocarlo en la escena para realizar distintas capturas y mediciones de las mismas, tal como se describe a continuación:

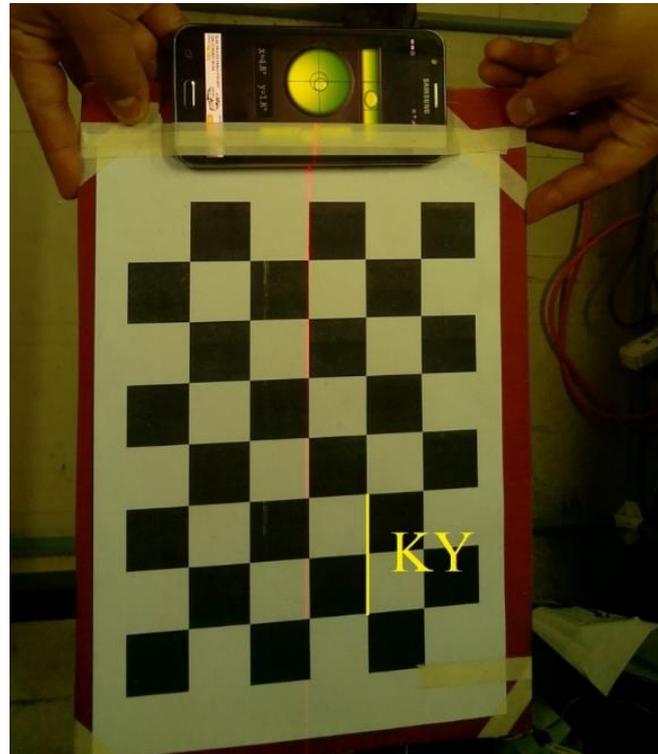


Figura 14-2 Fotografía para calcular constantes en eje y

Fuente: Lema, H. Martínez, P. 2017

KY: medida de altura de dos cuadros completos

Así, se toma 10 muestras de los valores dentro de la fotografía, los cuales se presenta en la tabla:

Tabla 5-2 Medidas para escala en eje y

Nº Medida	KY
1	197
2	195
3	187
4	187
5	195
6	205
7	197
8	195
9	193
10	196
Promedio	194,7

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

La medida de cada cuadro del tablero de ajedrez en el mundo real es de 30 mm, y se compara esta medida con la medida de dos cuadros dentro de la fotografía, de esta manera tenemos:

$$m_{\text{cuadro}} = 30\text{mm}$$

$$\text{Escala en } y = \frac{2 \cdot 30\text{mm}}{194,7\text{px}} = 0.3081\text{mm/px}$$

2.3.5. *Procesamiento de Datos*

Dada la naturaleza de funcionamiento del prototipo en desarrollo, es necesario incorporar como unidad de procesamiento un microcomputador; el mismo que debe contar con las siguientes características:

- Ser liviano.
- Tener buena capacidad de manejo de datos.
- Ser económico.
- Tener bajo consumo de energía.
- Permitir la realización de acciones de control sobre sus puertos de manejo de periféricos.

2.3.5.1. *Raspberry PI 3*

El Raspberry Pi 3 es un microcomputador con alta capacidad de procesamiento de datos en relación a su tamaño y costo; además cuenta con una comunidad de soporte en constante desarrollo, y hoy en día se utiliza en un sinnúmero de aplicaciones. En el presente trabajo es la médula del sistema, coordinando el funcionamiento del motor, láser y cámaras. Además, realiza el almacenamiento de datos para su posterior procesamiento. En la Figura 13-2 se ilustra la colocación de la misma en la estructura:

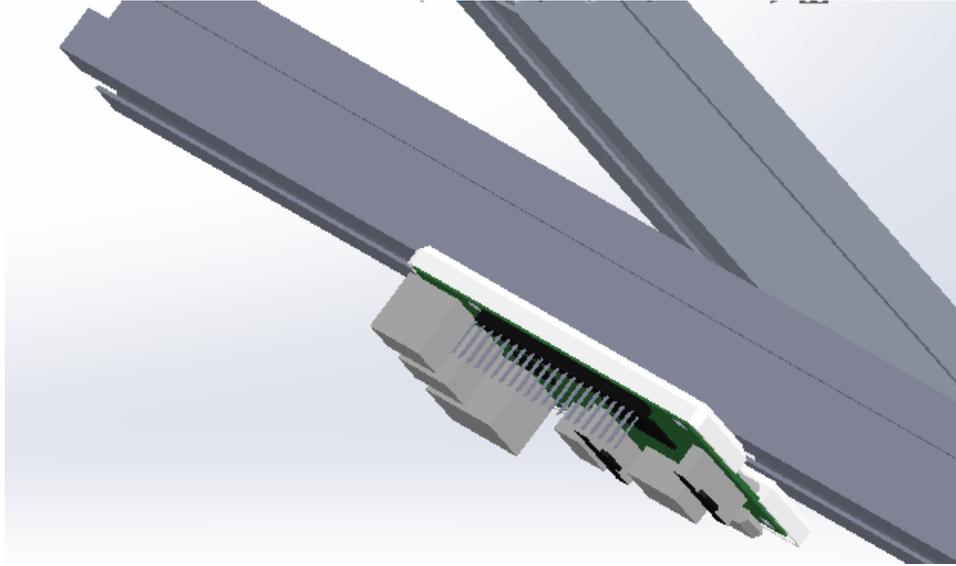


Figura 15-2 Ubicación de Raspberry Pi3 en Sistema de Escaneo

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4. Software

2.4.1. *Ubuntu Mate*

Durante el proceso de investigación, se establece que para contribuir en el desarrollo de un sistema de bajo costo, es necesario el uso de software no licenciado; por tanto se busca un sistema operativo que cumple con esta característica, y se selecciona una distribución disponible para Raspberry PI3 que, además de poseer las mismas características que los tradicionales como: Raspbian, y Noobs trae instalados por defecto los paquetes de PiCamera, Tkinter, y presenta compatibilidad con paquetes de visualización y manejo de nubes de puntos, lo cual resultó de mucha ayuda en el desarrollo del proyecto.

Para su instalación, se prepara una tarjeta de memoria microSD de clase 6 o superior, en la cual se monta su imagen y se procede tal como con otros sistemas operativos instalables para Raspberry. Una vez que se instala el sistema operativo, se puede observar la pantalla de bienvenida; tal como se ilustra en la Figura 14-2:

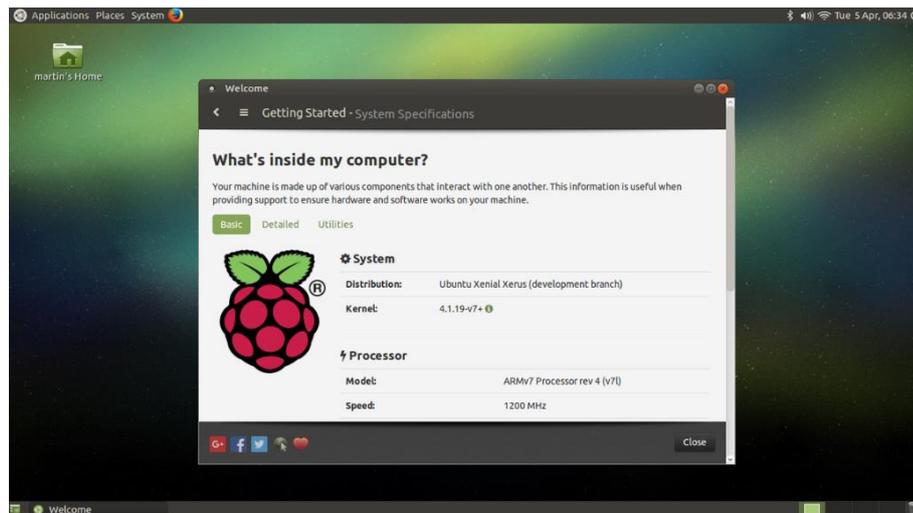


Figura 16-2 Escritorio de inicio en Ubuntu Mate para Raspberry

Fuente: <https://goo.gl/KOfDIP>

2.4.2. Python

Ubuntu Mate trae instalado este paquete de software por defecto, en el mismo se puede realizar programas en un lenguaje que lleva su mismo nombre. Entre sus principales características, se tiene que el mismo es multiplataforma, por lo cual se puede realizar el desarrollo y pruebas de código tanto dentro del entorno de Raspberry como dentro de Windows.

2.4.3. OpenCV

OpenCv permite realizar operaciones de procesamiento de imágenes, muy útil en el desarrollo del trabajo de investigación; sin embargo, no viene instalado de forma nativa; por lo cual se debe seguir el siguiente procedimiento para su descarga, compilación e instalación.

1. Abrir el terminal de comandos.
2. Realizar la actualización de paquetes instalados, tecleando los comandos:
 - `sudo apt-get update`
 - `sudo apt-get upgrade`
3. Descargar las librerías y paquetes necesarios, mediante la línea de comando:

- wget <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-unix/2.4.10/opencv-4.10.zip>
4. Al finalizar la descarga, descomprimir el archivo y crear los directorios para su compilación, por medio de los siguientes comandos:
 - unzip openCV-2.4.10.zip
 - cd opencv-2.4.10
 - mkdir build
 - cd build
 5. Realizar la compilación dentro del kernel de Raspberry, gracias al comando:
 - cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=RELEASE -D INSTALL_C_EXAMPLES=ON -D INSTALL_PYTHON_EXAMPLES=ON -D BUILD_EXAMPLES=ON -D WITH_QT=ON -D CMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local -D WITH_OPENGL=ON -D WITH_V4L=ON -D BUILD_NEW_PYTHON_SUPPORT=ON -D WITH_TBB=ON
 - make
 6. Instalar mediante el comando:
 - sudo make install

Una vez que finaliza proceso, se puede hacer uso de las librerías, ejemplos y herramientas que permite este paquete realizando su inclusión dentro de los códigos fuente de los programas desarrollados.

2.4.4. Tkinter

Con el objetivo de facilitar el manejo del sistema de escaneo, se crea una interfaz gráfica de usuario, para lo cual se hace uso del paquete Tkinter. Dentro de un archivo de Python se realiza la importación de los distintos módulos necesarios para la construcción de la misma.

Se procede a añadir botones para comandar las distintas acciones y una caja de texto para establecer los directorios de almacenamiento de los datos. A continuación, en la Figura 15-2 se muestra el aspecto final de la GUI:

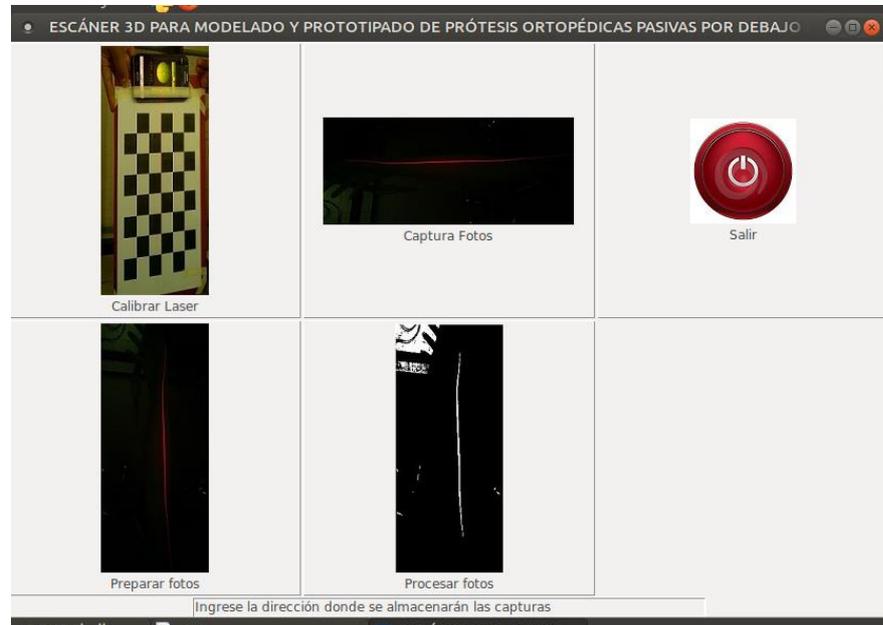


Figura 17-2 Aspecto de GUI desarrollada

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.5. VNC

Con base en las características del proceso a realizar por el dispositivo de escaneo, en el cual se encontrará rotando alrededor del miembro a digitalizar; es necesario trabajar sobre la tarjeta Raspberry Pi3 desde un punto remoto, el cual puede ser otro computador. De este modo podemos acceder a la interfaz gráfica de usuario que se creó para el proyecto y ejercer control sobre la misma.

Con el fin de obtener esta funcionalidad se hace uso del software VNC (Virtual Network Computing o Computación Virtual en Red); el mismo que se cimienta en una configuración de cliente-servidor y posibilita al cliente la ejecución de acciones y comandos sobre el servidor vía remota, a la vez que permite la visualización del entorno gráfico; con el único requerimiento de que ambos equipos se encuentren conectados a la misma red, condición que se ve fácilmente satisfecha gracias a la comunicación WI-FI que posee la tarjeta Raspberry Pi3.

El proceso de control se completa realizando el acceso vía remota desde una portátil; en este caso una ASUS X455L, gracias al software VNCViewer, el mismo que permite conectarse desde Windows realizando los siguientes pasos:

- Abrir el programa VNCViewer.
- Digitar la dirección IP asignada a la Raspberry Pi3, seguida del número de puerto 5900; de la siguiente manera: 192.168.1.50:5900
- Presionar la tecla Enter

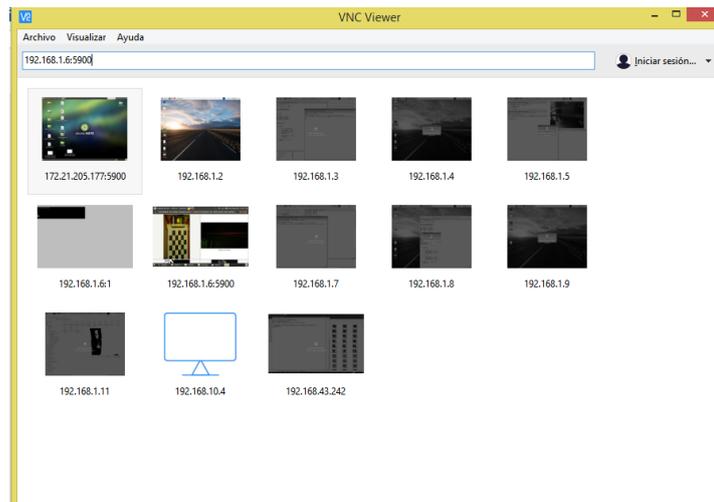


Figura 18-2 Programa VNC Viewer

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Así, se encontrará conectado remotamente de una manera rápida y sencilla; tal como se ilustra en la siguiente figura:

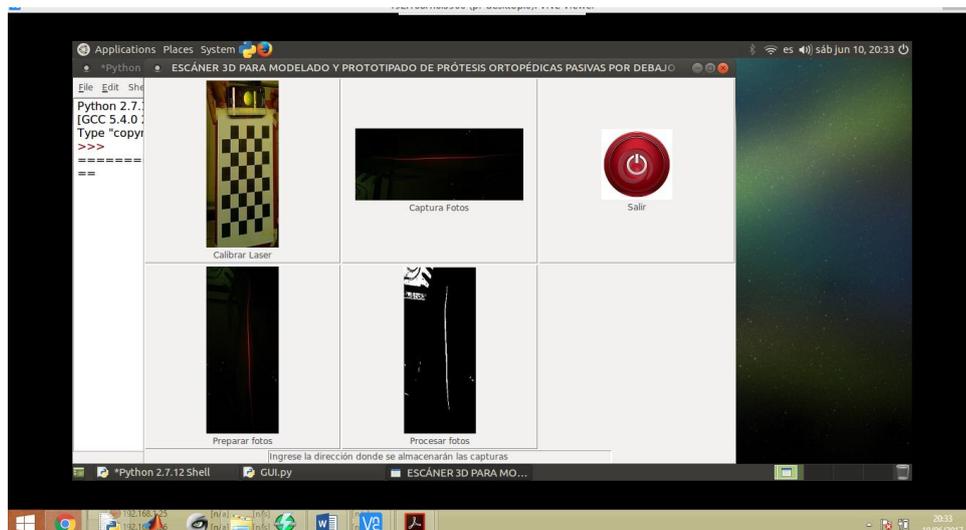


Figura 19-2 Vista de GUI desarrollada desde Windows por medio de VNC

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6. Diagramas de flujo de programas desarrollados

Se analiza la estructura del software desarrollado en la elaboración del proyecto, para esto se presentan los diagramas de flujo de cada una de las distintas etapas del proceso de reconstrucción de los datos; tales como:

- Programa de la tarjeta de desarrollo NodeMCU.
- Programa de adquisición de imágenes.
- Programa de preprocesamiento de imágenes.
- Programa de procesamiento de imágenes y obtención de nube de puntos.

Además, se presenta un diagrama de flujo de la interfaz gráfica de usuario desarrollada.

2.4.6.1. Diagrama de Flujo de Interfaz Gráfica de Usuario

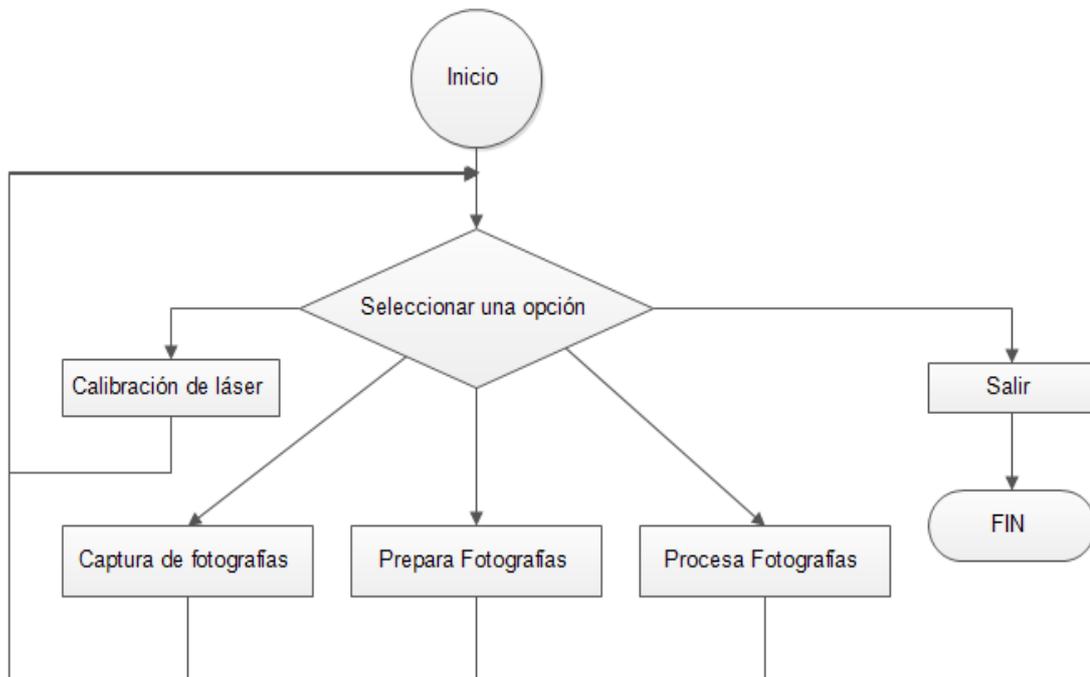


Gráfico 1-2 Diagrama de Flujo GUI

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6.2. Diagrama de Flujo de Programa de Tarjeta de Desarrollo NodeMCU

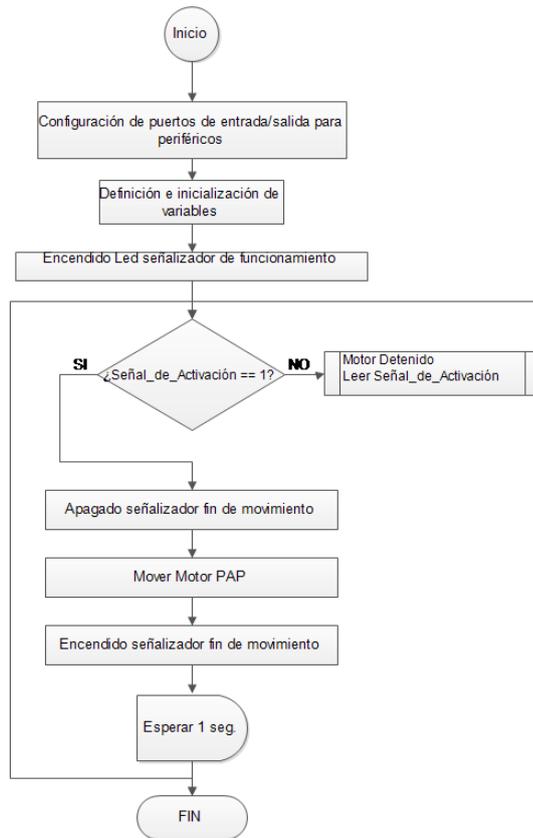


Gráfico 2-2 Diagrama de Flujo NodeMCU

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6.3. Diagrama de Flujo de Programa de Calibración de Láser

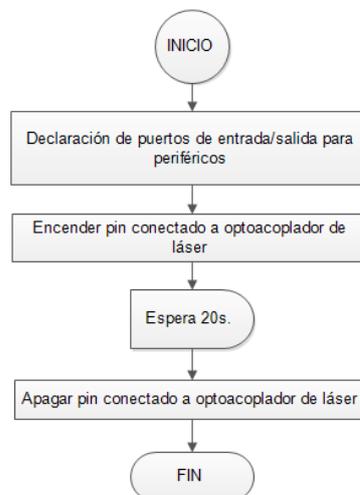


Gráfico 3-2 Diagrama de Flujo Calibración Láser

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6.4. Diagrama de Flujo de Programa de Captura de Imágenes

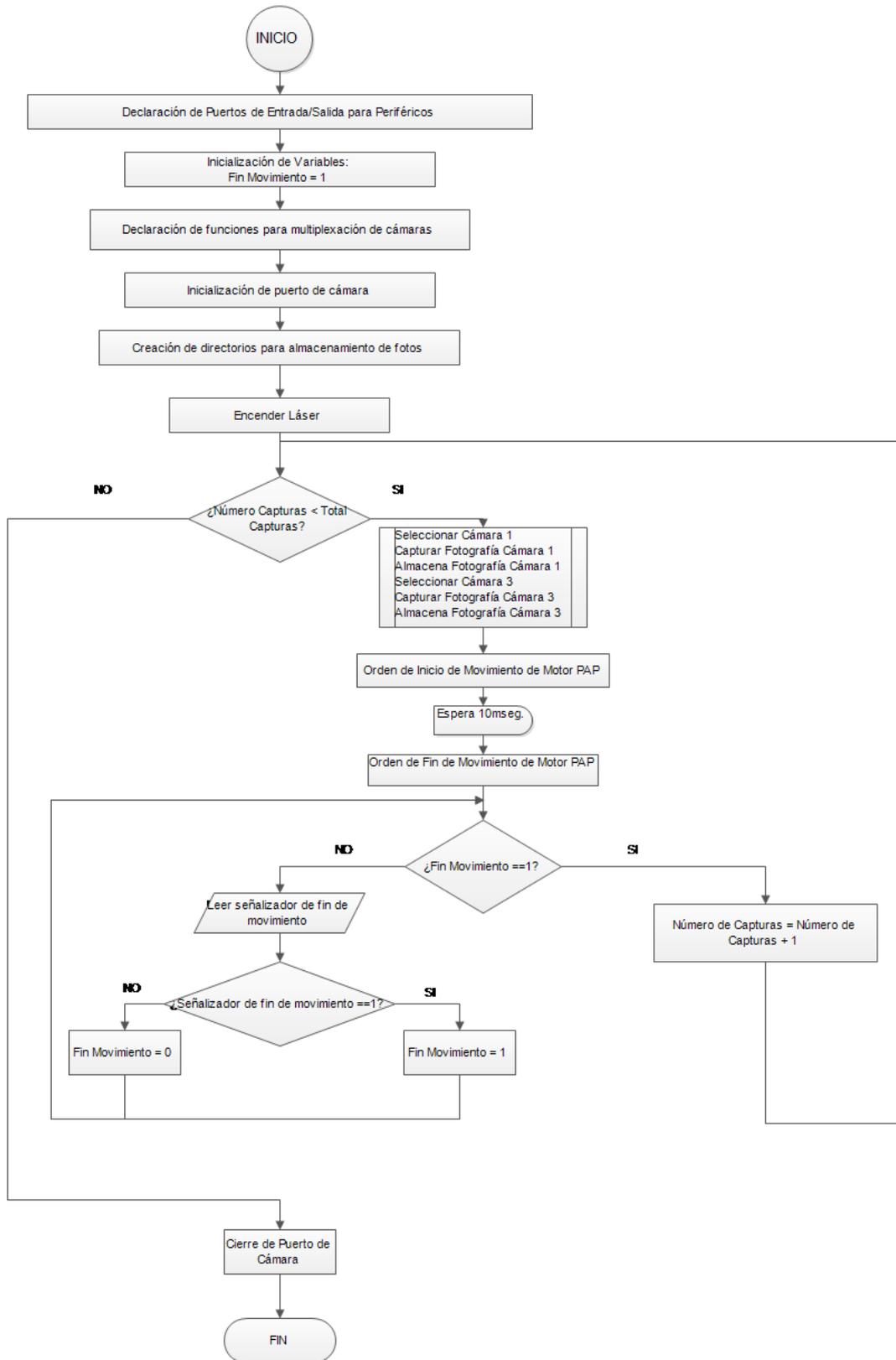


Gráfico 4-2 Diagrama de Flujo Captura de Imágenes

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6.5. Diagrama de Flujo de Programa de Preprocesamiento de Imágenes

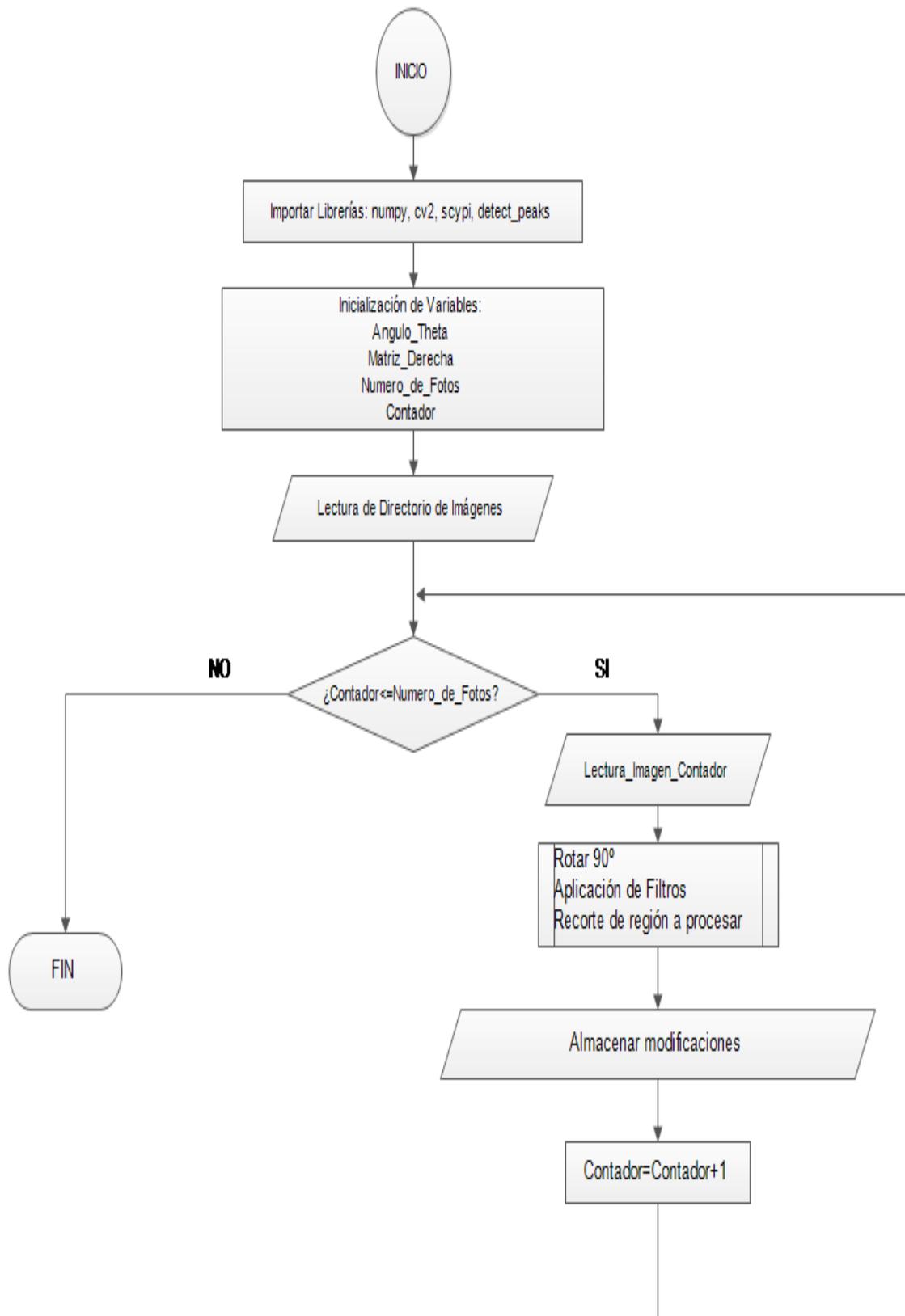


Gráfico 5-2 Diagrama de Flujo Preprocesamiento de Imágenes

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.4.6.6. Diagrama de Flujo de Programa de Procesamiento de Imágenes

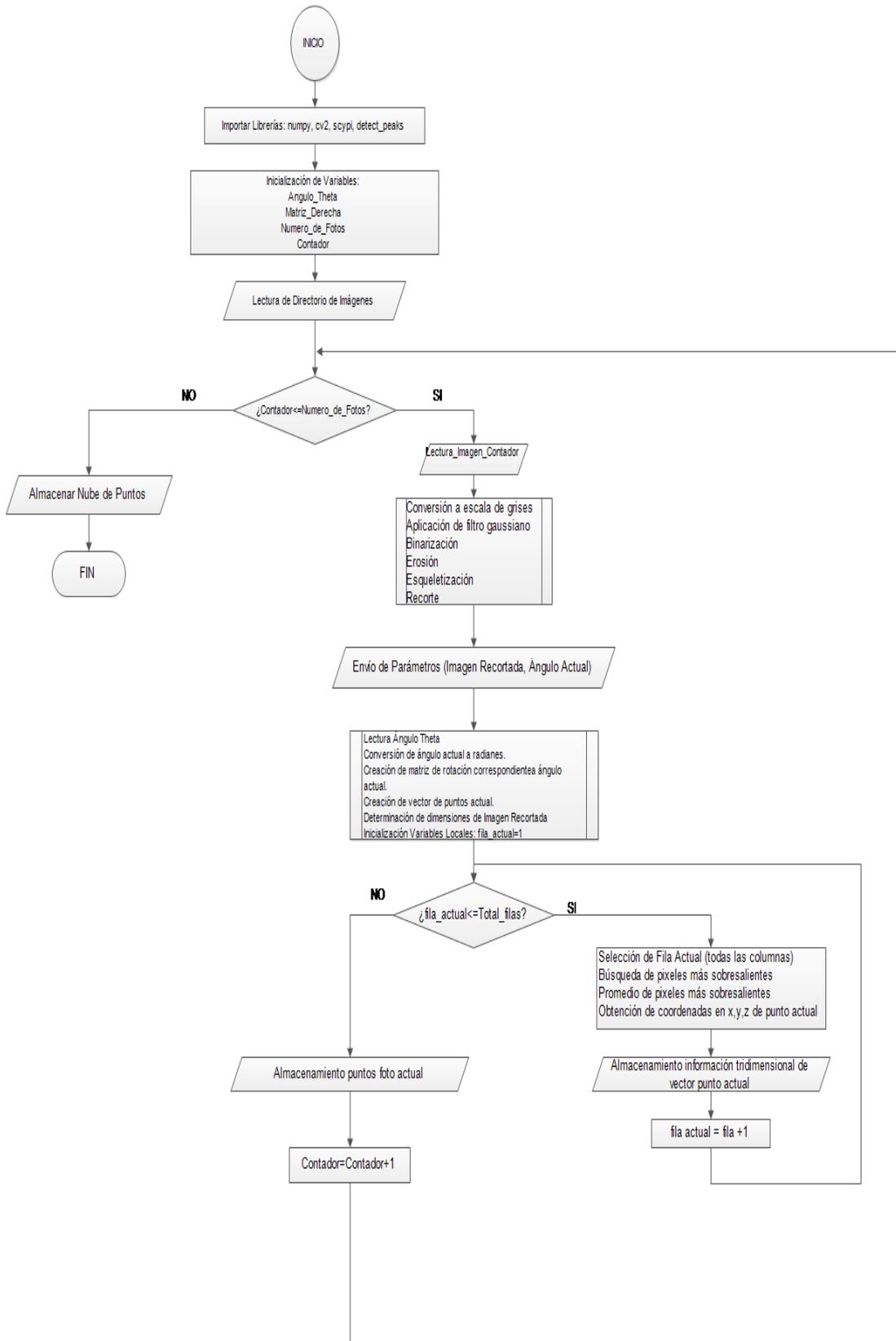


Gráfico 6-2 Diagrama de Flujo Procesamiento de Imágenes

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.5. Mecánica del Sistema

2.5.1. Determinación de torque necesario en el sistema rotacional

Los escáneres 3D convencionales se caracterizan por tener un plato rotatorio sobre el cual se colocan los objetos a digitalizar mientras las cámaras y el haz láser permanecen fijos; en cambio, en el prototipo desarrollado, puesto que se digitalizarán miembros superiores de los seres humanos se requiere que todo el sistema de adquisición de datos rote alrededor de dichos miembros; entonces, se debe calcular el torque necesario para realizar dicha tarea.

Por medio de una balanza electrónica, se determina el peso de todos los elementos que se requería movilizar, la misma que da como resultante una masa aproximada de $0,57kg$. A continuación, en la Figura 18-2 se presenta el diagrama de cuerpo libre:

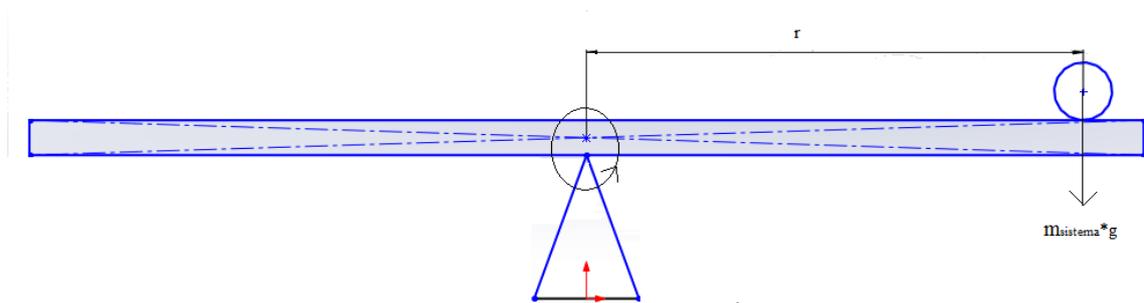


Figura 20-2 Diagrama de cuerpo libre de sistema de captura

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Young y Freedman, (2009: p.316) definen el esfuerzo necesario para efectuar o producir un movimiento de rotación (torque) como:

$$\tau = F * l$$

En donde:

τ : torque requerido para producir rotación

F : fuerza aplicada

l : distancia a la que se aplica la fuerza (brazo de palanca)

De dicha ecuación, se deduce la expresión que representa el torque requerido para levantar el peso del sistema de captura:

$$\tau_{sistema_captura} = m_{sistema_captura} * g * r$$

En donde:

$m_{sistema_captura}$: masa total de elementos del sistema de captura

g : gravedad = $9.8 \frac{m}{s^2}$

r : distancia desde el centro hacia el punto donde se coloca la carga

$$\tau_{sistema_captura} = 0.57kg * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.6m$$

$$\tau_{sistema_captura} = 3.3516Nm$$

Además, se debe tomar en cuenta el torque necesario para poder mover la barra de aluminio sobre la cual se coloca el sistema de captura, la misma que depende de la siguiente ecuación:

$$\tau_{barra_aluminio} = m_{barra_aluminio} * g * r$$

$$\tau_{barra_aluminio} = 0.5kg * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.6m$$

$$\tau_{barra_aluminio} = 2.94Nm$$

Finalmente, se realiza la suma de todos los torques que se requieren para el funcionamiento del sistema, con lo cual obtenemos la siguiente ecuación:

$$\tau_{total} = \tau_{sistema_captura} + \tau_{barra_aluminio}$$

$$\tau_{total} = 3.3516Nm + 2.94Nm$$

$$\tau_{total} = 6.2916Nm$$

Al valor calculado, se añade un margen de 20% por razones de seguridad y para permitir ligeras mejoras a futuro:

$$\tau_{total} = 1.2 * 6.2916Nm$$

$$\tau_{total} = 7.5499Nm$$

Al observar los parámetros de funcionamiento del motor seleccionado, se determina que carece del torque necesario; por lo cual se presenta la necesidad de realizar el diseño y construcción de

un mecanismo que nos posibilita obtener un aumento del mismo y así satisfacer los requerimientos del sistema rotacional.

2.5.2. Sistema Rotacional

Esta etapa comprende la construcción del sistema mecánico que permite realizar la rotación del sistema de adquisición de datos durante el proceso de escaneo.

El sistema mecánico rotatorio se compone principalmente de:

- Tren de engranajes.
- Eje transversal de aluminio.
- Sistema de adquisición de datos.

2.5.2.1. Tren de engranajes

Para conseguir el aumento de torque necesario se opta por la realización de un tren de engranajes, el mismo que se compone de varios engranajes conectados entre sí con fines de: modificación de velocidad, sentido de giro, e incluso obtención de relaciones de transmisión de fuerza bastante elevadas.

Los engranes que componen el sistema pueden clasificarse como motrices e impulsados o conducidos; siendo los motrices aquellos que generan el movimiento y los impulsados aquellos a los cuales es transmitido.

El elemento básico de un tren de engranajes se conoce como rueda dentada doble, la misma que no es sino la agrupación de dos engranes con similares características y distinto número de dientes. Varias ruedas dentadas dobles agrupadas nos permiten construir las distintas etapas de un mecanismo de este tipo.

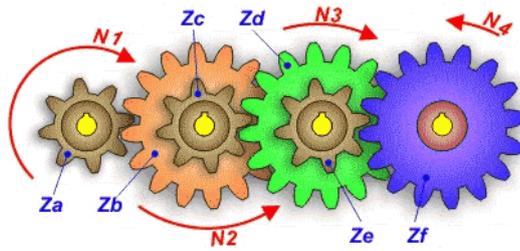


Figura 21-2 Diagrama ejemplo tren de engranajes

Fuente: <https://goo.gl/tNzZ2S>

Budynas y Nisbeth, (2008, p.679) definen el valor de un tren de engranajes como:

$$e = \frac{\text{producto del número de dientes de engranes motrices}}{\text{producto del número de dientes de engranes impulsados}}$$

$$e = \frac{Z_a}{Z_b} \times \frac{Z_c}{Z_d} \times \frac{Z_e}{Z_f}$$

En el presente proyecto, se plantea la construcción de un tren de engranajes de tres etapas, conformado por un engrane doble y dos engranajes simples; de este modo obteniendo la ecuación de ganancia de torque:

$$m = \frac{Z_b}{Z_a} \times \frac{Z_d}{Z_c}$$

Se realiza una multiplicación $m = 8$; con el fin de que la ganancia de torque sea suficiente para permitir el movimiento de la carga actual del diseño del equipo y las futuras mejoras del mismo. De esta manera separamos los productos como dos enteros:

$m = n_1 \times n_2$, en donde:

$$n_1 = \frac{Z_b}{Z_a} = 2$$

$$n_2 = \frac{Z_d}{Z_c} = 4$$

Se establece: $Z_c = Z_a = 12$, se obtiene: $Z_b = 24$ y $Z_d = 48$ y se procede a realizar el diseño del tren de engranajes. Durante este proceso, se encuentra un dispositivo multiplicador de fuerza con características similares a las necesarias dentro del mercado; a continuación, se presenta una fotografía ilustrativa del mismo:



Figura 22-2 Tren de engranajes adquirido

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Sin embargo, se requiere efectuar modificaciones al mismo para que sea de mayor utilidad; tales como cambiar la estructura externa de la reductora y acoplar el eje transversal para la rotación de las cámaras; para esto se realiza un diseño en SolidWorks tal como se ilustra en la siguiente figura:

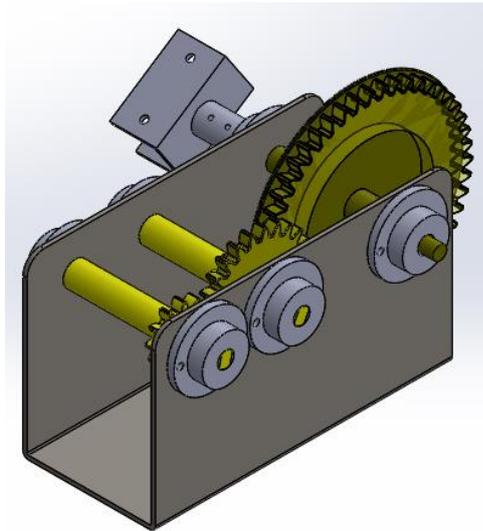


Figura 23-2 Tren de engranajes dibujado en Solidworks

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.5.2.2. Eje transversal de aluminio

Con base en la necesidad de ubicar las cámaras a una distancia de al menos 60 cm de separación desde la cámara hacia el centro del sistema, se dimensiona un eje transversal de 130cm de modo que las cámaras se puedan colocar en cualquiera de los dos extremos.

2.5.2.3. Sistema de captura.

Para colocar los elementos del sistema de captura se realiza la construcción de una cruz de aluminio, que permite la correcta ubicación de los mismos, de modo que se reduzcan los errores de medición. A continuación; se presenta una gráfica ilustrativa de la estructura antes mencionada:

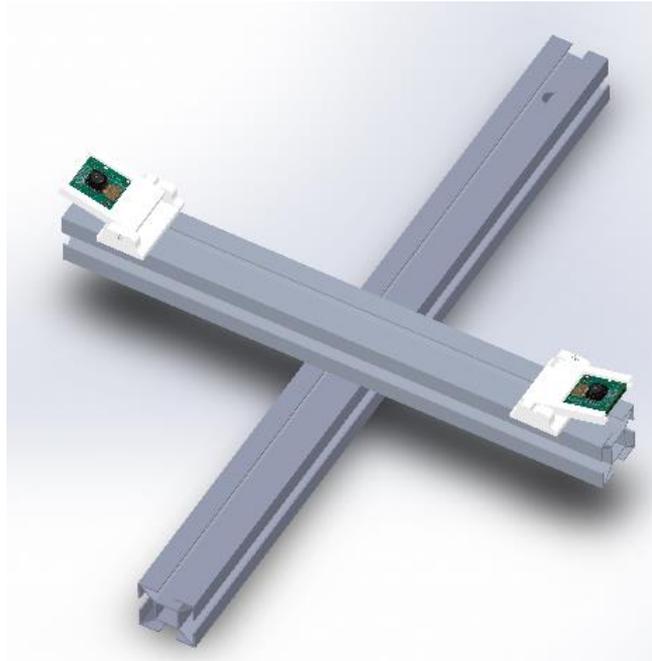


Figura 24-2 Sistema de captura

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

2.5.3. *Equilibrio de pesos en el sistema rotacional*

Con el fin de disminuir la carga en el trabajo que efectúa el motor, se procede a equilibrar los pesos en ambos lados del eje transversal de aluminio. Mediante el uso de una balanza electrónica se determina que la masa del brazo lateral de aluminio es de aproximadamente $0,288\text{kg}$; mientras que la masa total que reposa en el lado opuesto es de 0.57kg , por lo tanto; se debe compensar la diferencia, ubicando un contrapeso en el lado contrario al que se han colocado los elementos del sistema de adquisición de imágenes. Tal como se ilustra en la siguiente figura:

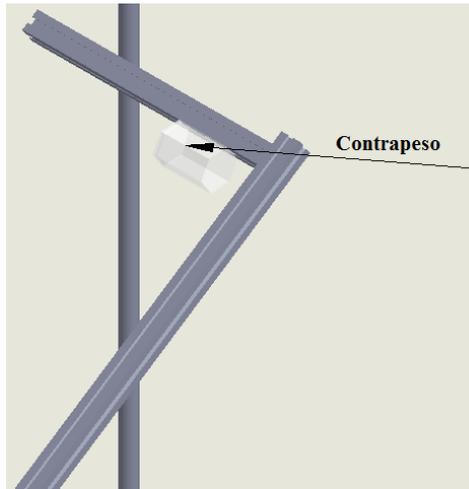


Figura 25-2 Colocación de contrapeso

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Dicho elemento se diseña a modo de contenedor, bajo características que permiten su llenado con cualquier material y su colocación y fijación en su respectivo riel. Para su diseño se hace uso del software SolidWorks y posteriormente, para su construcción se lleva a un proceso de impresión 3D que facilita su elaboración. Finalmente, se instala a la misma distancia desde el centro a la que se encuentra el sistema de adquisición de datos y se coloca arena en su interior hasta lograr el equilibrio deseado.

El contrapeso se llena con arena, hasta obtener un peso de 0.282kg, logrando así igualar las cargas en ambos lados del eje transversal de aluminio; a continuación, se presentan los cálculos efectuados en esta sección, para los cuales partimos del análisis del diagrama de cuerpo libre; el cual se ilustra en la siguiente figura:

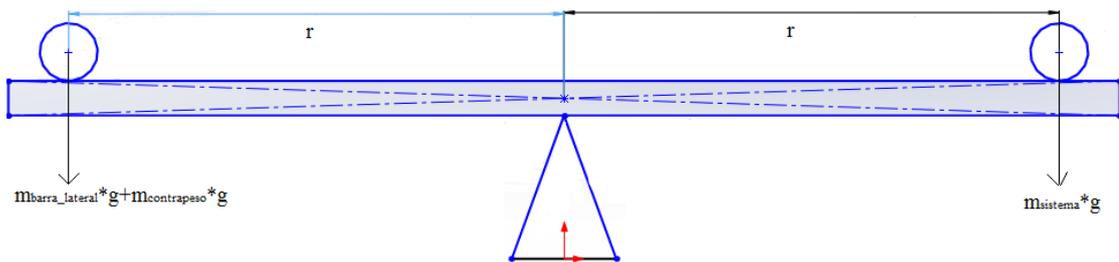


Figura 26-2 Diagrama de cuerpo libre de sistema equilibrado

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Para lograr el equilibrio del sistema, la suma total de los torques que afectan al mismo debe igualarse a cero; para facilitar esta tarea se colocará las cargas a la misma distancia que se encuentra el sistema de captura.

Young y Freedman, (2009: p.355) definen la condición en la que un sistema rotacional se encuentra en reposo como:

$$\Sigma \tau = 0$$

$$\tau_{contrapeso} + \tau_{brazo_lateral_aluminio} = \tau_{sistema_captura}$$

$$(0,282kg) * (9.8 \frac{m}{s^2}) * (0.6m) + (0,288kg) * (9.8 \frac{m}{s^2}) * (0.6m) = 3.3516Nm$$

$$3.3516Nm = 3.3516Nm$$

Con lo cual se demuestra que el sistema ahora cumple con la condición de equilibrio rotacional.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS

3.1. Determinación de indicadores

3.1.1. Indicadores para contraste

Para poder establecer los indicadores tomados en cuenta para la realización de pruebas estadísticas, se debe primeramente determinar las necesidades o expectativas acerca del desempeño del prototipo de Escáner 3D desarrollado, en la Tabla 1-3 presentamos las distintas posibilidades:

Tabla 1-3 Objetivos de desempeño de Escáner 3D

Objetivo Principal	Métodos de Posicionamiento	Principales Limitaciones
Rapidez, Simplicidad	Geometría (Características Naturales)	Precisión, Características y Desempeño dependen del Objeto
Flexibilidad	Geometría + Objetivos (Híbrido)	Comprometido con la exactitud
Confiabilidad, Precisión	Objetivos	Objetivos fijos en el objeto

Fuente: CREAFORM. (Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity)

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Luego de analizar la Tabla 1-3, se decide tomar como indicadores de desempeño la Rapidez, Precisión y Exactitud del prototipo desarrollado, definiendo dichos indicadores como:

- Rapidez. - Tiempo medido que toma el dispositivo en realizar la captura y procesamiento de los datos hasta obtener un modelo digitalizado del objeto escaneado. En este caso las mediciones se tomarán en seg.
- Precisión. - Medida de variación existente entre los distintos datos tomados sobre un mismo objeto al obtener su modelo digital. En este caso las mediciones se tomarán en mm.

- Exactitud. - Medida de diferencia existente entre los datos tomados mediante mediciones realizadas en el modelo digital y el valor real de dichos datos; en este caso las mediciones se tomarán en mm.

Los indicadores antes mencionados, se seleccionan debido a que se tiene como propósito que el dispositivo cumpla con expectativas de rapidez a la vez que brinda una precisión y exactitud con márgenes de error de hasta 2mm, debido a que por principios de simetría en el cuerpo la máxima diferencia de medidas entre las secciones derecha e izquierda se encuentra comprendida en el intervalo de 2-4mm.

3.1.2. Número de pruebas

Para la evaluación del desempeño del dispositivo, se desarrollaron experimentos comparativos simples, los mismos que permiten realizar la comparación de los resultados obtenidos bajo distintas condiciones o tratamientos. En dichos experimentos se tomaron mediciones de los parámetros de funcionamiento del prototipo desarrollado y de los resultados obtenidos; para posteriormente ser contrastados con medidas obtenidas mediante un dispositivo Kinect for Windows trabajando como instrumento patrón y también, contrastando los resultados con medidas reales.

Debido a lo expuesto anteriormente, se plantea la estimación de una media poblacional para cada proceso que realiza el prototipo de escáner 3D desarrollado, para lo cual se desarrolló 30 pruebas para la medición de cada uno de los indicadores planteados, y posteriormente, realizar su evaluación bajo la prueba T de Student para contraste de medias de dos muestras pareadas y normales.

3.2. Post-procesamiento de nube de puntos

Una vez que se obtiene el fichero PLY resultante de la digitalización se puede trabajar sobre el mismo dentro de cualquier programa de diseño CAD, para posteriormente poderlo llevar de forma correcta a un proceso de impresión en 3D. A continuación, se presentan los pasos a seguir.

3.2.1. *Procesamiento dentro de MeshLab*

Se procede a importar el fichero PLY accediendo al menú: File -> Import Mesh; se realiza la búsqueda del fichero PLY y se selecciona Abrir, tal como se muestra en la siguiente figura:

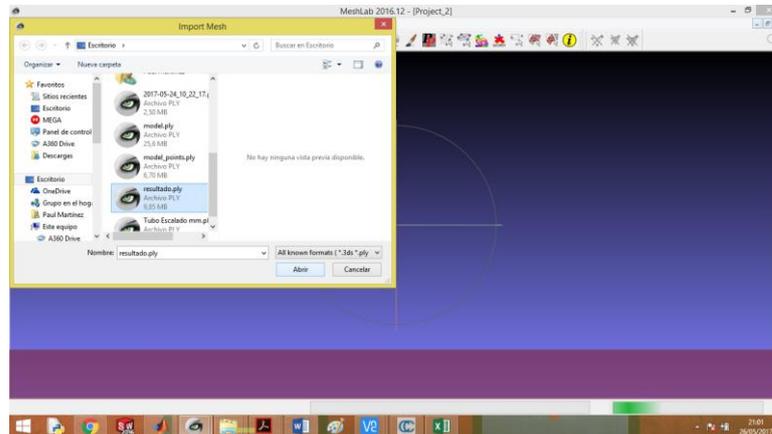


Figura 1-3 Importación de fichero PLY a MeshLab

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Una vez que se ha abierto el archivo se procede a la eliminación del ruido, según criterio personal del usuario del prototipo de Escáner 3D, el cual debe examinar minuciosamente la nube de puntos generada e identificar las zonas en las que se presenten datos demasiado dispersos. Para esto se selecciona la herramienta: Select Vertices y se lleva a cabo la selección de forma manual.

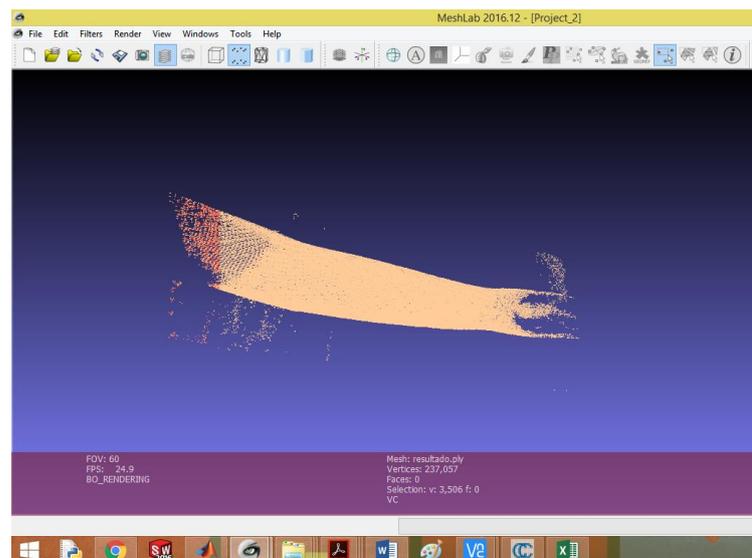


Figura 2-3 Selección de datos atípicos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Una vez que se selecciona los datos, se procede a eliminarlos utilizando la herramienta Filter select, tal como se presenta en la siguiente figura:

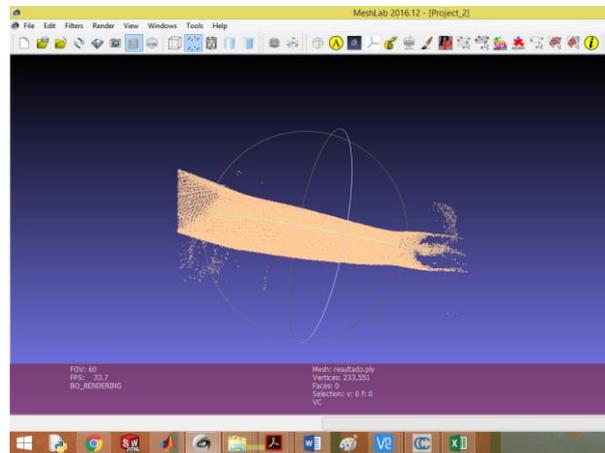


Figura 3-3 Borrado de datos atípicos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se procede de la misma forma hasta que se ha eliminado todos los grupos de datos que se encuentren demasiado alejados de la concentración mayoritaria de puntos, tales como ruido y datos atípicos. Posteriormente, se realiza el cálculo de normales a los puntos presentes, ingresando en el menú: Filters-> Normals, Curvatures and Orientations-> Compute normals for point sets; tal como se ilustra en la siguiente figura:

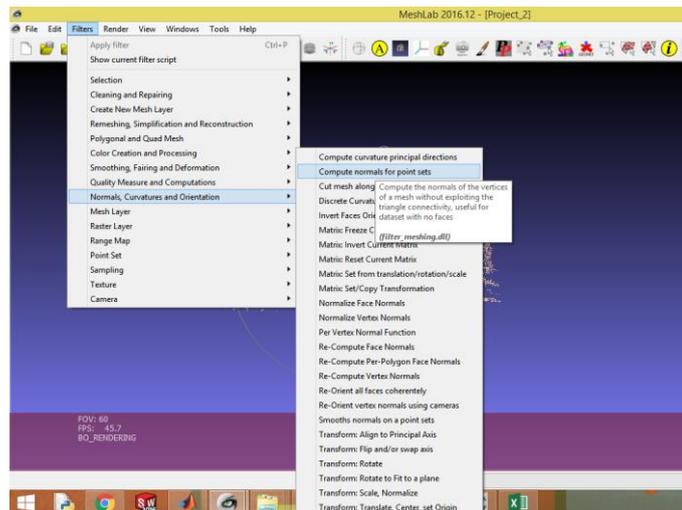


Figura 4-3 Cálculo de normales a los puntos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se ingresan los parámetros por defecto y se presiona el botón Apply, de lo cual se obtiene:

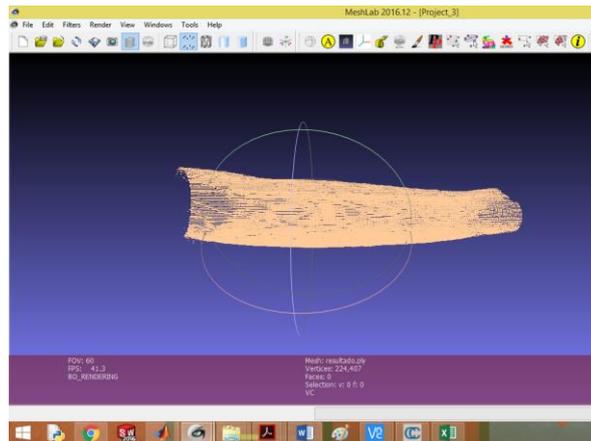


Figura 5-3 Resultado de cálculo de normales a los puntos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Luego, se procede a muestrear los puntos, Filters-> Sampling-> Point Cloud Simplification y se aplican los parámetros por defecto:

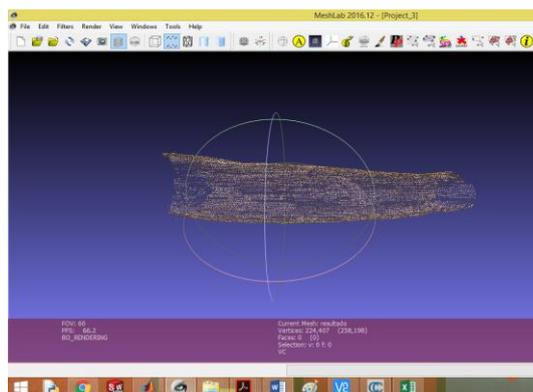


Figura 6-3 Muestreo de puntos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

A continuación, se efectúa el proceso de recalculando las Normales, obteniendo como resultado:

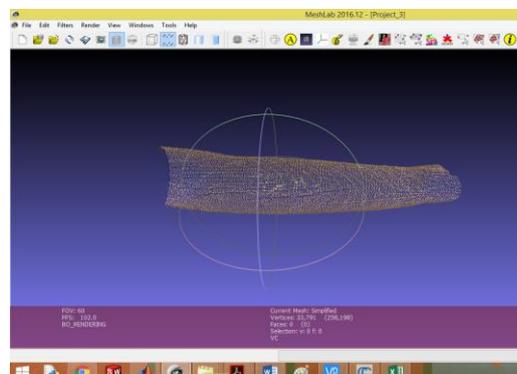


Figura 7-3 Recalculado de normales a los puntos

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Como paso final dentro del software MeshLab se realiza la generación de superficies, para esto se selecciona el menú: Filters-> Remeshing, Simplification and Reconstruction -> Screened Poisson Surface Reconstruction y se obtiene la superficie, tal como se ilustra en la siguiente figura:

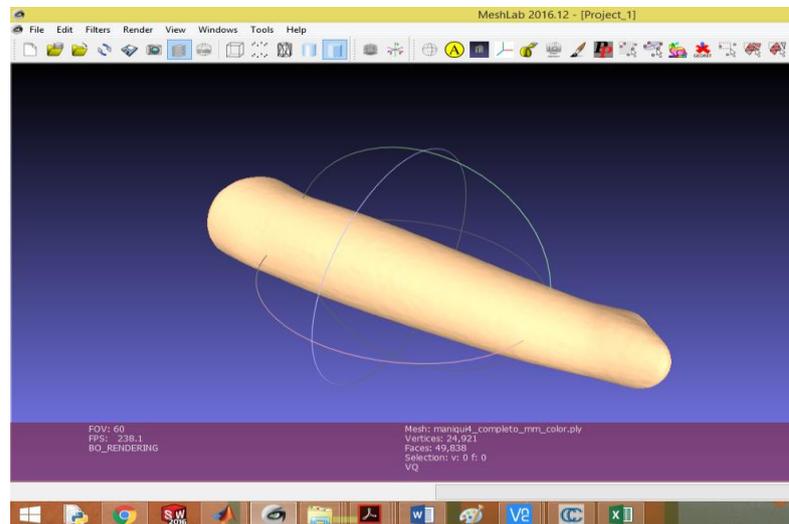


Figura 8-3 Resultante de post-procesamiento

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Una vez que se concluye este proceso se puede escoger entre varios tipos de codificación para exportar nuestro fichero y llevarlo hacia otros programas de diseño CAD, e incluso hacia un proceso de impresión 3D.

3.3. Pruebas de rapidez del sistema

Para realizar distintas pruebas, con el fin de determinar el tiempo que se precisa en la realización de las distintas tareas; se usa el mismo objeto que en el proceso de calibración y se realiza mediciones al realizar 30 pruebas.

3.3.1. Mediciones de tiempo requerido en cada etapa

Aquí, se presentan individualmente los tiempos necesarios por cada una de las etapas del proceso de adquisición y digitalización de datos.

3.3.1.1. Tiempo total de adquisición de datos.

Se lleva a cabo la medición de tiempos gracias a una herramienta nativa del software Python, la misma que permite establecer banderas al inicio y al final de la ejecución del programa y cuantificar el tiempo transcurrido.

Tabla 2-3 Tiempos tomados en adquisición de datos

<i>Nº Prueba</i>	<i>Tiempo (seg)</i>
1	502,665
2	497,097
3	493,153
4	495,985
5	496,268
6	494,51
7	493,491
8	495,542
9	493,524
10	493,045
11	494,282
12	497,845
13	495,643
14	494,253
15	493,054
16	497,057
17	494,089
18	494,343
19	507,071
20	496,885
21	496,537
22	502,611
23	494,105
24	495,349
25	493,268
26	494,269
27	517,492
28	502,75
29	496,889
30	492,459
Promedio	496,8510333

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se obtuvo un promedio de 496,851 seg, lo cual equivale aproximadamente a 8min y 17seg

3.3.1.2. Tiempo total de preprocesamiento de imágenes.

Se sigue un procedimiento similar al presentado anteriormente, y se obtuvo las siguientes medidas:

Tabla 3-3 Mediciones de tiempo en el preprocesamiento de imágenes

Nº Prueba	Tiempo (seg)
1	65,126
2	62,162
3	73,544
4	67,538
5	86,123
6	106,803
7	73,925
8	67,692
9	72,741
10	60,565
11	65,142
12	64,174
13	65,334
14	65,693
15	63,535
16	67,057
17	71,242
18	66,24
19	67,705
20	86,215
21	80,972
22	78,111
23	81,827
24	85,094
25	75,119
26	62,852
27	65,221
28	62,741
29	65,246
30	68,017
Promedio	71,45853333

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se obtiene un promedio de 71,459 *seg*, lo cual equivale a 1*min* y 11*seg*. Tomando en cuenta que estos datos se refieren al tiempo requerido por cada uno de los elementos de captura, se debe duplicar el mismo, obteniendo un total aproximado de 2*min* y 22*seg*

3.3.1.3. Tiempo total de procesamiento de datos.

De la misma manera que en las secciones anteriores, se efectúa la cuantificación del tiempo gracias al software Python, obteniendo las siguientes medidas:

Tabla 4-3 Mediciones de tiempo en el procesamiento de imágenes

Nº Prueba	Tiempo (seg)
1	332,45
2	329,835
3	329,046
4	383,982
5	385,618
6	388,274
7	386,055
8	389,208
9	384,349
10	385,696
11	385,018
12	385,456
13	385,855
14	384,491
15	386,176
16	383,989
17	386,974
18	386,322
19	384,122
20	384,977
21	385,876
22	387,874
23	385,224
24	384,515
25	384,868
26	384,207
27	383,802
28	386,519
29	383,379
30	382,734
Promedio	379,8963667

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Se obtiene un promedio de 379,8963667 seg, lo cual equivale aproximadamente a 6min y 20seg. Lo cual corresponde al tiempo requerido para los datos de una de las cámaras; y,

por tanto, debe duplicarse obteniendo un total de 12min y 40seg.

3.3.2. *Tiempo total estimado de adquisición y procesamiento de datos*

Para obtener un estimado de la rapidez con la que se podría realizar el proceso completo de adquisición, manejo de datos y creación del modelo digital, se efectúa la suma los tiempos requeridos para obtener una estimación del tiempo necesario desde el inicio de la captura de datos hasta llegar a la obtención del modelo digitalizado en formato de nube de puntos.

$$t_{total} = t_{captura} + t_{preprocesamiento} + t_{procesamiento}$$

$$t_{total} = 8,28333 \text{ min} + 2,36667 \text{ min} + 12,66667$$

$$t_{total} = 23,31667$$

$$t_{total} = 23 \text{ min} 19 \text{ seg}$$

Así, se obtiene un estimado de aproximadamente 23min19seg necesarios para la realización del proceso.

3.3.3. *Pruebas de precisión del sistema*

Dentro de este apartado, se muestra la comparativa entre los resultados otorgados por el prototipo desarrollado en contraste con aquellos que nos brinda el dispositivo Kinect for Windows, para esto se hace uso del software Skanect el mismo que tiene la capacidad de generar ficheros de nube de puntos y de mallado.

Una vez que se obtiene las nubes de puntos, se realiza el post procesamiento en MeshLab para eliminar el ruido que puede producirse a veces por las fallas mecánicas del sistema o deficiencias del sistema de aislamiento lumínico. Posteriormente se utiliza el paquete de software CloudCompare, en el cual se realiza la aplicación de un algoritmo RANSAC de detección de formas aplicable a la nube de puntos en la cual se establece un cilindro base de radio 55mm. Se usa como parámetro la desviación estándar como indicador de la dispersión de los datos, ya que la misma se encuentra expresada en las mismas unidades que la variable de interés.

3.3.3.1. Cálculo de diferencia entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows

Luego de realizarse las pruebas correspondientes, se obtienen las medidas que se presentan a continuación:

Tabla 5-3 Medidas de diámetro de objeto de calibración según Cámaras y Kinect

N.º Prueba	Medida Radio Según Cámara 1 (mm)	Medida Radio Según Cámara 2 (mm)	Medida Radio Según Kinect (mm)
1	55,2155	55,488	55,629
2	54,532	54,5	55,896
3	54,3844	54,323	55,039
4	55,7149	55,659	56,755
5	55,801	56,94	56,766
6	55,852	56,125	56,156
7	55,852	55,402	56,349
8	54,142	54,37	55,714
9	54,062	54,673	55,111
10	56,0332	56,967	56,948
11	56,079	55,765	56,498
12	53,82	54,938	55,093
13	53,7277	53,31	54,335
14	53,562	54,511	54,089
15	56,473	55,113	56,62
16	56,5544	56,766	56,963
17	56,779	56,204	56,495
18	56,7873	56,516	57,043
19	56,8858	57,453	56,074
20	56,96	55,499	56,354
21	57,227	57,505	56,129
22	57,45	56,204	56,548
23	57,459	57,567	57,508
24	57,564	57,514	57,972
25	57,756	57,254	57,842

N.º Prueba	Medida Radio Según Cámara 1 (mm)	Medida Radio Según Cámara 2 (mm)	Medida Radio Según Kinect (mm)
26	58,217	58,089	58,597
27	58,301	58,868	58,736
28	58,572	59,197	59,559
29	58,655	58,728	58,927
30	59,19	59,84	59,213
Media muestral	56,32027333	56,37626667	56,6986
Desviación estándar	1,600898069	1,62000085	1,382585449

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Para la realización de los contrastes, se realiza la comparación entre las medidas otorgadas por la cámara 1 y el dispositivo Kinect, así como el cotejo entre aquellas medidas arrojadas por la cámara 2 y el dispositivo Kinect. De la siguiente manera:

Se busca comprobar que la precisión del sistema desarrollado se asemeja a aquella otorgada por el sistema comercial, con una confianza de 95%.

Inicialmente se toman los datos de la cámara 1 y del Kinect para trabajar sobre ellos y realizar:

1. Establecimiento de hipótesis nula e hipótesis alternativa:

$H_0: \mu_K - \mu_{C1} = 0$ (No existe diferencia significativa entre las medias de Cámara 1 y Kinect)

$H_1: \mu_{C1} < \mu_K$ (La media de diámetro medido por el Kinect es mayor que la media de diámetro medida por la Cámara 1).

2. Establecimiento de requerimientos de los datos, para aplicar la prueba T de contraste de medias para muestras pareadas:
 - Normalidad de los datos. - Los datos deben ajustarse a una distribución normal.
 - Igualdad de varianzas (homocedasticidad). - Los datos pueden (o no) cumplir la condición de homocedasticidad, sin embargo, debe comprobarse el valor de esta condición, ya que la misma ingresa como parámetro en la prueba T.
3. Determinación de normalidad de los datos, mediante la aplicación del test de Shapiro dentro del Software R, tal como se presenta en la siguiente figura:

```

R Console
> #Medidas de radio
> C1=c(55.2155,54.532,54.3844,55.7149,55.801,55.852,55.852,54.142,54.062,
+ 56.0332,56.079,53.82,53.7277,53.562,56.473,56.5544,56.779,56.7873,56.8858,
+ 56.96,57.227,57.45,57.459,57.564,57.756,58.217,58.301,58.572,58.655,59.19)
> C2=c(55.488,54.5,54.323,55.659,56.94,56.125,55.402,54.37,54.873,56.967,
+ 55.765,54.938,53.31,54.511,55.113,56.766,56.204,56.516,57.453,55.499,
+ 57.505,56.204,57.567,57.514,57.254,58.089,58.868,59.197,58.729,59.84)
> Ck=c(55.629,55.896,55.039,56.755,56.766,56.156,56.349,55.714,55.111,56.948,
+ 56.498,55.093,54.335,54.089,56.62,56.963,56.495,57.043,56.074,56.354,
+ 56.129,56.548,57.508,57.972,57.842,58.597,58.736,59.559,58.927,59.213)
> shapiro.test(C1)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  C1
W = 0.96065, p-value = 0.3219

> shapiro.test(Ck)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  Ck
W = 0.96723, p-value = 0.4665

```

Figura 9-3 Captura Ingreso de datos Cámara 1 vs Kinect a R

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

4. Se analiza el p-value (probabilidad de que los resultados obtenidos sean estadísticamente significativos) entregado como resultado de las pruebas realizadas sobre cada conjunto de datos.
 - Al trabajar con valor de significancia de 95%, este valor debería ser al menos mayor a 0.05 para determinar que los datos examinados se distribuyen de forma normal.
 - El p-value para el conjunto de datos de cámara 1 (C1) es 0.3219, por tanto, se determina que se distribuye de forma normal.
 - El p-value para el conjunto de datos de Kinect (Ck) es 0.4665, por tanto, se determina que se distribuye de forma normal.
5. Si se cumple que ambos conjuntos de datos se distribuyen de forma normal, se procede a determinar si las varianzas de dichas poblaciones son iguales, para lo cual se realiza la prueba var.test() dentro del software R, tal como se presenta en la figura a continuación:

```

> var.test(C1,Ck)

      F test to compare two variances

data:  C1 and Ck
F = 1.3407, num df = 29, denom df = 29, p-value = 0.4346
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 0.6381433 2.8168816
sample estimates:
ratio of variances
 1.340736

```

Figura 10-3 Captura prueba de varianza datos Cámara 1 vs Kinect en R

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

6. Se realiza el análisis del resultado de la prueba aplicada, y se observa un p-value de 0.4346, por lo cual se establece que las varianzas son iguales.

7. Una vez comprobada la igualdad de varianzas, se procede a la aplicación de la prueba T para medias de muestras pareadas, tal como se muestra a continuación:

```
> t.test(C1,Ck,paired = TRUE, var.equal=TRUE)

Paired t-test

data: C1 and Ck
t = -3.1807, df = 29, p-value = 0.003486
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.6215919 -0.1350615
sample estimates:
mean of the differences
 -0.3783267
```

Figura 11-3 Resultados prueba T en R para datos Cámara 1 vs Kinect

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

8. Se realiza la prueba dentro del software Excel, para comparar sus resultados con las de R; las cuales entregan la Tabla 6-3:

Tabla 6-3 Resultados prueba T para datos Cámara 1 vs Kinect

Prueba t para medias de dos muestras pareadas		
	Medida Radio Según Cámara 1	Medida Radio Según Kinect
Media	56,32027333	56,6986
Varianza	2,562874628	1,911542524
Observaciones	30	30
Coeficiente de correlación de Pearson	0,914890108	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	29	
Estadístico t	-3,180746465	
P(T<=t) una cola	0,001742776	
Valor crítico de t (una cola)	1,699127027	
P(T<=t) dos colas	0,003485552	
Valor crítico de t (dos colas)	2,045229642	

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

9. Se observa un p-value de 0.03486 en R, y P(T<=t) de 0,0034855 en Excel; el mismo que indica que se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa; por tanto, se establece que las medidas captadas según la cámara 1 presentan menor media que aquellas medidas por el Kinect.

A continuación, tomamos los datos entregados por la cámara 2 y el Kinect para trabajar sobre ellos y realizar:

1. Establecimiento de hipótesis nula e hipótesis alternativa:

$H_0: \mu_K - \mu_{C2} = 0$ (No existe diferencia significativa entre las medias de Cámara 2 y Kinect)

$H_1: \mu_{C2} < \mu_K$ (La media de diámetro medido por el Kinect es mayor que la media de diámetro medida por la Cámara 2).

2. Determinación de normalidad de datos y varianza de los mismos:

- p-value(C2) = 0.7713
- p-value(Ck) = 0.4665
- p-value(var.test(C2, Ck)) = 0.3985

3. Aplicación de Prueba T en R, los resultados se presentan en la Figura 12-3:

```
> t.test(C2,Ck,paired = TRUE, var.equal=TRUE)
Paired t-test
data: C2 and Ck
t = -2.5412, df = 29, p-value = 0.01665
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.58175227 -0.06291439
sample estimates:
mean of the differences
 -0.3223333
```

Figura 12-3 Captura prueba de varianza datos Cámara 1 vs Kinect en R

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

4. Aplicación de Prueba T en Excel, los resultados se presentan en la Tabla 7-3:

Tabla 7-3 Resultados prueba T para datos Cámara 2 vs Kinect

Prueba t para medias de dos muestras pareadas		
	Medida Radio Según Cámara 2	Medida Radio Según Kinect
Media	56,37626667	56,6986
Varianza	2,624402754	1,911542524
Observaciones	30	30
Coeficiente de correlación de Pearson	0,904836377	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	29	
Estadístico t	-2,541239613	
P(T<=t) una cola	0,008326906	
Valor crítico de t (una cola)	1,699127027	
P(T<=t) dos colas	0,016653812	
Valor crítico de t (dos colas)	2,045229642	

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

- Se observa un p-value de 0.01665 en R, y $P(T \leq t)$ de 0,00166538 en Excel; el mismo que indica que se debe rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa; por tanto, se establece que las medidas captadas según la cámara 2 presentan menor media que aquellas medidas por el Kinect.

Además, al analizar los datos tabulados, se tiene que:

- Los datos capturados por la Cámara N.º 1 presentan una desviación estándar de 1,6 mm.
- Los datos capturados por la Cámara N.º 2 presentan una desviación estándar de 1,62 mm.
- Los datos capturados por el dispositivo Kinect for Windows presentan una desviación estándar de 1,38 mm.

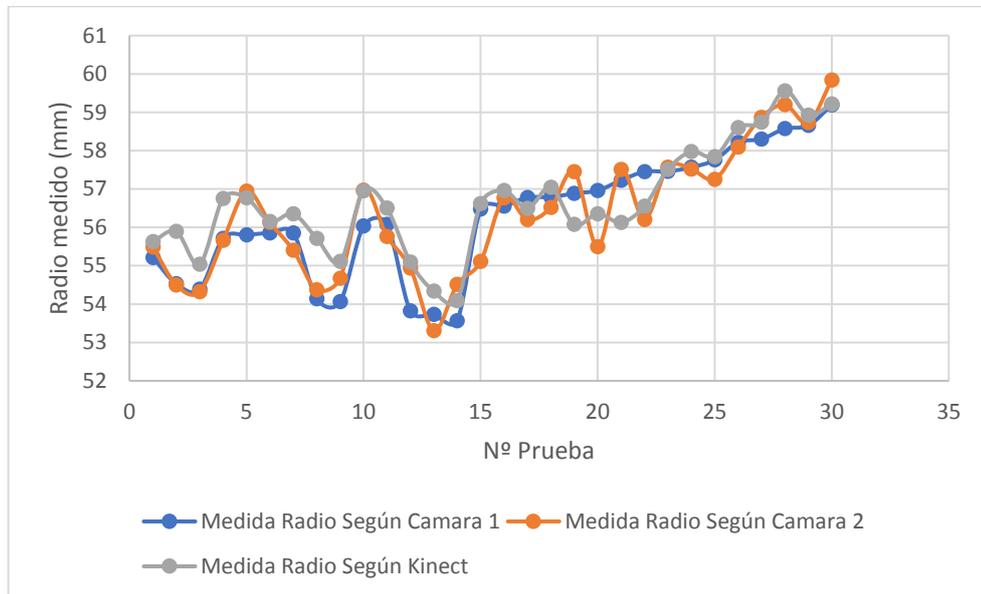


Gráfico 1-3 Gráfico de dispersión de medidas obtenidas por Cámaras y Kinect

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

En el gráfico anterior, se presenta la dispersión de los datos obtenidos.

3.3.3.2. Cálculo de error absoluto entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows

A continuación, se realiza el cálculo de la diferencia entre las medidas obtenidas por medio de nuestro dispositivo y del Kinect para encontrar el error absoluto producido en las medidas:

Tabla 8-3 Cálculo de error absoluto

N.º Prueba	Error entre Kinect y Cámara 1 (mm)	Error entre Kinect y Cámara 2 (mm)
1	0,4135	0,141
2	1,364	1,396
3	0,6546	0,716
4	1,0401	1,096
5	0,965	0,174
6	0,304	0,031
7	0,497	0,947
8	1,572	1,344
9	1,049	0,438
10	0,9148	0,019
11	0,419	0,733
12	1,273	0,155
13	0,6073	1,025
14	0,527	0,422
15	0,147	1,507
16	0,4086	0,197
17	0,284	0,291
18	0,2557	0,527
19	0,8118	1,379
20	0,606	0,855
21	1,098	1,376
22	0,902	0,344
23	0,049	0,059
24	0,408	0,458
25	0,086	0,588
26	0,38	0,508
27	0,435	0,132
28	0,987	0,362
29	0,272	0,199
30	0,023	0,627
Media Muestral	0,625113333	0,601533333
Desviación Estándar	0,410178517	0,464565257

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Analizando los datos tabulados, se tiene que:

- El error absoluto entre aquellos datos capturados por la Cámara N.º 1 y el dispositivo Kinect presentan desviación estándar de 0,401 mm.
- El error absoluto entre aquellos datos capturados por la Cámara N.º 2 y el dispositivo Kinect presentan desviación estándar de 0,475 mm.

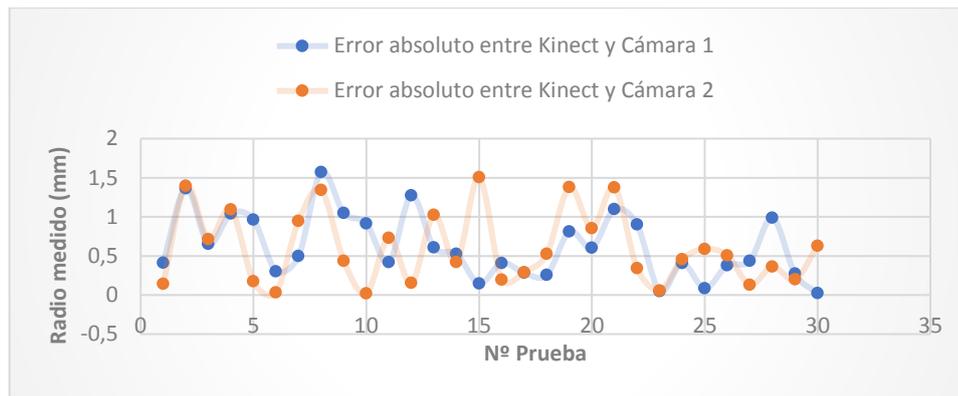


Gráfico 2-3 Gráfico de dispersión de error absoluto entre cámaras y dispositivo Kinect

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

En el gráfico anterior se puede observar la forma en la que se presenta el error absoluto entre las mediciones efectuadas mediante el uso de las cámaras y del dispositivo Kinect for Windows.

3.3.3.3. Cálculo de error relativo entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y utilizando el dispositivo Kinect for Windows

En la siguiente tabla, se presenta el error porcentual en las mediciones realizadas:

Tabla 9-3 Cálculo de error porcentual

N.º Prueba	Error Porcentual entre Kinect y Cámara 1	Error Porcentual entre Kinect y Cámara 2
1	0,743317334	0,253464919
2	2,440246171	2,497495349
3	1,189338469	1,300895728
4	1,832613867	1,931107391
5	1,699961244	0,306521509
7	0,88200323	1,680597704
8	2,821552931	2,412320063
9	1,903431257	0,794759667
10	1,606377748	0,03336377
11	0,741619172	1,297391058
12	2,310638375	0,281342457
13	1,117695776	1,886445201
14	0,974320102	0,780195604
15	0,259625574	2,661603674

N.º Prueba	Error Porcentual entre Kinect y Cámara 1	Error Porcentual entre Kinect y Cámara 2
16	0,717307726	0,345838527
17	0,502699354	0,515089831
18	0,448258331	0,923864453
19	1,447729786	2,459250276
20	1,07534514	1,517194875
21	1,956208021	2,451495662
22	1,595105044	0,608332744
23	0,085205537	0,102594422
24	0,703788036	0,790036569
25	0,148680889	1,01656236
26	0,648497363	0,86693858
27	0,740602016	0,224734405
28	1,657180275	0,607800668
29	0,461588067	0,337705975
30	0,038842822	1,058889095
Media Muestral	1,109704292	1,06663453

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Analizando los datos tabulados, se tiene que:

- Los datos capturados por la Cámara N.º 1 presentan como promedio un error relativo del 1,10%
- Los datos capturados por la Cámara N.º 2 presentan como promedio un error relativo del 1.067%.

3.3.3.4. Conclusión en base a datos recabados

Al observar y analizar los datos previamente adquiridos, se concluye que los dispositivos y algoritmos empleados representan una buena aproximación en cuanto a precisión con respecto al dispositivo comercial utilizado para contraste; sin embargo, se debe tomar en cuenta que en el dispositivo comercial se producen fallas en las mediciones principalmente por error humano.

3.3.4. Mediciones de exactitud

En este apartado, se realiza la comparativa entre los datos recabados mediante el uso del prototipo desarrollado y las mediciones reales del objeto digitalizado para las cuales se usó un calibrador electrónico. Se procedió de la misma manera que en el apartado anterior para la obtención de las mediciones y se usó nuevamente la desviación estándar como indicador de la dispersión de los datos.

3.3.4.1. Comparación entre medidas obtenidas por medio de Cámaras y medida real

Tabla 10-3 Medidas de diámetro de objeto de calibración según Cámaras y medida real

N.º Prueba	Medida Radio Según Cámara 1 (mm)	Medida Radio Según Cámara 2 (mm)	Medida Real (mm)
1	55,2155	55,488	55,28
2	54,532	54,5	55,15
3	54,3844	54,323	55,17
4	55,7149	55,659	54,95
5	55,801	56,94	54,99
6	55,852	56,125	55,04
7	55,852	55,402	54,9
8	54,142	54,37	55,05
9	54,062	54,673	55,24
10	56,0332	56,967	54,62
11	56,079	55,765	55,01
12	53,82	54,938	54,97
13	53,7277	53,31	55,29
14	53,562	54,511	54,81
15	56,473	55,113	55,28
16	56,5544	56,766	54,89
17	56,779	56,204	55,02
18	56,7873	56,516	54,98
19	56,8858	57,453	55,36
20	56,96	55,499	54,92
21	57,227	57,505	55,2

N.º Prueba	Medida Radio Según Cámara 1 (mm)	Medida Radio Según Cámara 2 (mm)	Medida Real (mm)
22	57,45	56,204	55,06
23	57,459	57,567	55,26
24	57,564	57,514	54,89
25	57,756	57,254	54,97
26	58,217	58,089	55,17
27	58,301	58,868	54,65
28	58,572	59,197	55,17
29	58,655	58,728	55,22
30	59,19	59,84	55,09
Media Muestral	56,32027333	56,37626667	55,05
Desviación Estándar	0,474967679	0,719858827	0,183139919

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Analizando los datos tabulados anteriormente, se tiene que:

- Los datos capturados por la Cámara N.º 1 presentan una desviación estándar de 0,475 mm.
- Los datos capturados por la Cámara N.º 2 presentan una desviación estándar de 0,72 mm.
- Los datos capturados por el Calibrador Electrónico presentan una desviación estándar de 0,183 mm.

La información tabulada se expresa como un gráfico de dispersión que nos da información visual de la forma en la que se distribuyen los datos, tal como lo indica en el siguiente gráfico:

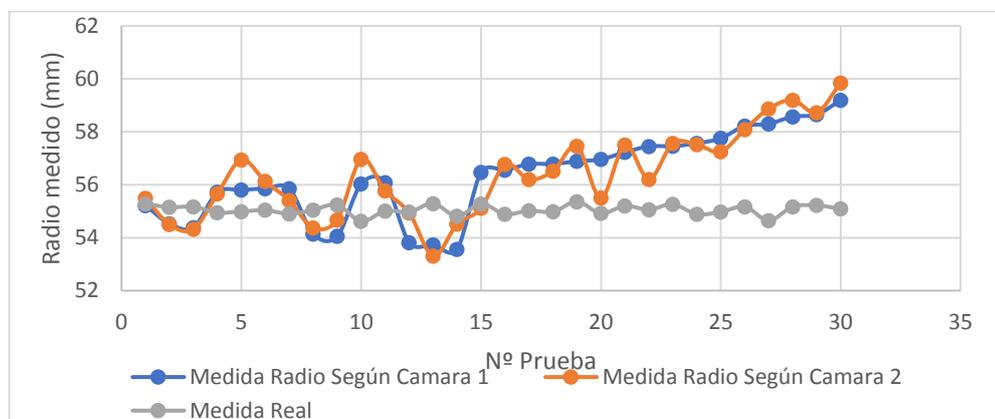


Gráfico 3-3 Gráfico de dispersión de medidas obtenidas mediante Cámaras y medida real

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.3.4.2. *Cálculo de error absoluto entre medidas obtenidas utilizando el prototipo desarrollado y medidas reales*

En la siguiente tabla, se presenta las diferencias absolutas entre las medidas obtenidas mediante el prototipo desarrollado y aquellas obtenidas por el equipo calibrador electrónico.

Tabla 11-3 Error entre medidas obtenidas por cámaras y medida real

N.º Prueba	Error entre Cámara 1 y medida real (mm)	Error entre Cámara 2 y medida real (mm)
1	0,0645	0,208
2	0,618	0,65
3	0,7856	0,847
4	0,7649	0,709
5	0,811	1,95
6	0,812	1,085
7	0,952	0,502
8	0,908	0,68
9	1,178	0,567
10	1,4132	2,347
11	1,069	0,755
12	1,15	0,032
13	1,5623	1,98
14	1,248	0,299
15	1,193	0,167
16	1,6644	1,876
17	1,759	1,184
18	1,8073	1,536
19	1,5258	2,093
20	2,04	0,579
21	2,027	2,305
22	2,39	1,144
24	2,199	2,307
25	2,674	2,624
26	2,786	2,284

N.º Prueba	Error entre Cámara 1 y medida real (mm)	Error entre Cámara 2 y medida real (mm)
27	3,047	2,919
28	3,651	4,218
29	3,402	4,027
30	3,435	3,508
Media	1,7679	1,671066667
Desviación Estándar	1,019284843	1,279608559

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Analizando los datos tabulados, se tiene que:

- Los datos capturados por la Cámara N.º 1 presentan una desviación estándar de 1,02 mm.
- Los datos capturados por la Cámara N.º 2 presentan una desviación estándar de 1,28 mm.

En la siguiente gráfica se presenta la dispersión de los errores existentes entre las medidas obtenidas según la cámara 1 y las medidas reales.

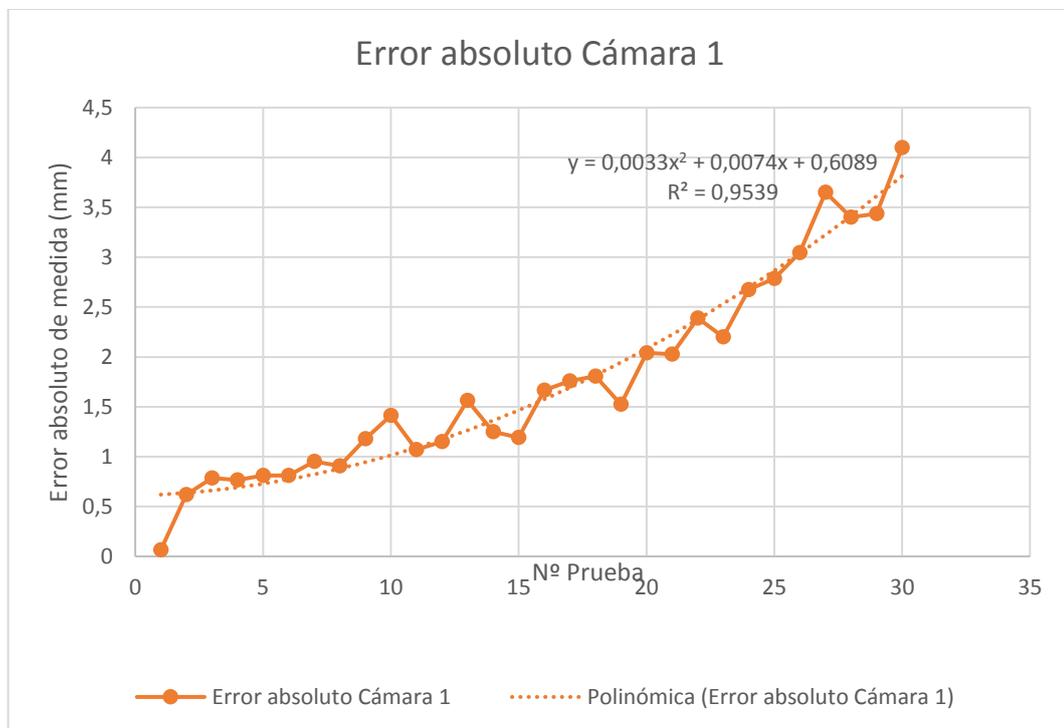


Gráfico 4-3 Gráfico de dispersión del error absoluto según las medidas de la Cámara 1

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.3.4.3. Conclusiones en base a datos recabados

Según los datos presentados en las tablas se concluye que:

- Las diferencias promedio entre las medidas reales y las medidas obtenidas por el dispositivo son de aproximadamente 1,7716 mm para la cámara 1 y 1,67mm para la cámara 2; las mismas que se encuentran dentro del margen planteado inicialmente de 2mm de error.
- La desviación estándar en los datos provenientes de la cámara 1 es 1,02 mm y en la cámara 2 son de 1,28mm; los cuales nos indican qué tan alejados se pueden encontrar los datos encontrados del promedio de los mismos.

3.4. Análisis de costos

La construcción del prototipo trata de generar un modelo el cual cuente con características funcionales aceptables a un costo de construcción asequible dentro de nuestro medio.

3.4.1. Costos de materiales y herramientas

Los materiales y herramientas necesarios para la construcción de la idea expuesta en este trabajo de titulación se encuentran enlistados a continuación:

Tabla 12-3 Costos de materiales y herramientas

Cantidad	Detalles	Valor unitario	Total
1	Barra de aluminio perfilado	\$36,50	\$36,50
8	Acoples de acero para aluminio	\$4,00	\$32,00
5	Tapas para barra de aluminio	\$0,40	\$2,00
1	Acople de nylon	\$1,20	\$1,20
1	Soporte en acrílico	\$3,50	\$3,50
2	Rollos de cable Rainbow	\$3,00	\$6,00
2	Metros de cable de timbre	\$0,25	\$0,50

Cantidad	Detalles	Valor unitario	Total
1	Acoples en impresión 3d	\$20,00	\$20,00
1	Circuito impreso	\$5,50	\$5,50
3	Resistores	\$0,05	\$0,15
1	Opto acoplador	\$0,45	\$0,45
3	Tiras de espadines	\$0,50	\$1,50
1	Tren de engranajes	\$35,00	\$35,00
1	Construcción mecánica	\$160,00	\$160,00
3	Conectores bus de datos	\$0,50	\$1,50
1	Case para Raspberry Pi	\$10,00	\$10,00
2	Flex cable Raspberry	\$11,00	\$22,00
1	Multímetro	\$10,00	\$10,00
TOTAL			\$349,60

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.4.2. Costos de equipos

El funcionamiento del prototipo depende de los equipos que lo componen, lo mismos que están en la siguiente tabla.

Tabla 13-3 Costos de equipos

Cantidad	Detalles	Valor unitario	Total
1	Raspberry Pi 3B	\$70,00	\$70,00
2	Pi Camera V1.2	\$20,00	\$40,00
1	Shield Multicamera Raspberry	\$60,00	\$60,00
1	Diodo láser	\$3,00	\$3,00
1	NodeMCU	\$15,00	\$15,00
1	Fuente de computador	\$30,00	\$30,00
1	Teclado inalámbrico	\$17,00	\$17,00
1	Conversor HDMI - VGA	\$14,00	\$14,00
1	Motor Paso a Paso	\$30,00	\$30,00
1	Driver Motor TB6600	\$15,00	\$15,00
1	Laptop Asus X410	\$900,00	\$900,00
1	Laptop Dell Inspiron	\$750,00	\$750,00
1	Router	\$20,00	\$20,00
TOTAL			\$1.964,00

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.4.3. Costos de implementación

La etapa de construcción tanto a nivel físico y software presenta costos los cuales se detallan a continuación:

Tabla 14-3 Costos de implementación

Cantidad (Personal)	Descripción	Tiempo	Precio	Total
2	Desarrollo de software	100	\$6,00	\$1.200,00
2	Procesamiento de datos	60	\$6,00	\$720,00
2	Ensamblaje del prototipo	40	\$4,00	\$320,00
TOTAL				\$2.240,00

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.4.4. Costo total de implementación del dispositivo

El costo total del dispositivo, se lo calcula en base a los sub-costos presentados anteriormente.

Tabla 15-3 Costo total

Descripción	Costo
Costo de materiales y herramientas	\$349,60
Costo de equipos	\$1.964,00
Costo de implementación	\$2.240,00
TOTAL	\$4.553,60

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.4.5. Costo aproximado de prototipado de prótesis vía Impresión 3D

Para estimar el costo del proceso de impresión 3D del modelo digitalizado, se procede a calcular el tiempo de uso de una impresora 3D y la cantidad de material necesario; para lo cual se utiliza dos paquetes de software muy conocidos, tales como: Cura Engine y Repetier Host. En este proceso se ha estimado una resolución de impresión de 0.5 debido a que no se requiere la

reproducción con alta fidelidad en cuanto a detalles existentes.

3.4.5.1. Según software Cura Engine

Se procede a importar como fichero STL el modelo digitalizado, presentando los siguientes resultados:

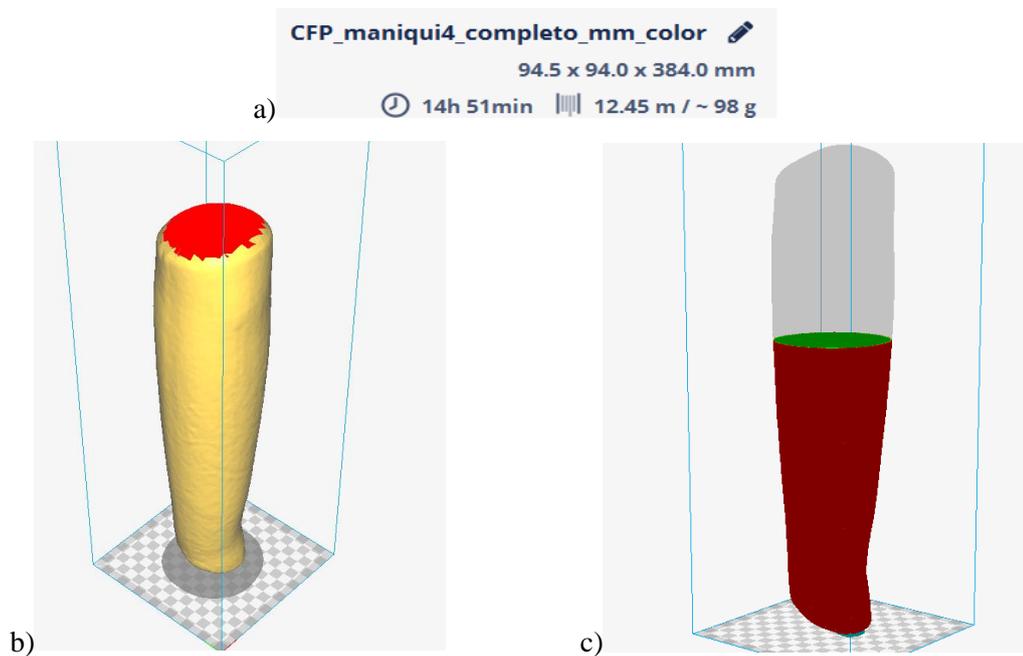


Figura 13-3 Resultados en software Cura Engine a) Material y tiempo estimado b) Vista lateral c) Vista por capas

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

A continuación, se presenta una tabla ilustrativa con el detalle de los costos:

Tabla 16-3 Costo estimado prototipado via impresión 3D en software Cura Engine

Detalle	Cantidad	Precio por hora	Subtotal 1	Precio por metro	Subtotal 2	TOTAL
Tiempo estimado de Impresión (h)	14,85	\$ 4,50	\$ 66,83	-	-	\$ 68,63
Cantidad estimada de filamento (m)	12,45	-	-	\$ 0,06	\$ 1,80	

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3.4.5.2. Según software Repetier Host

Se importó como fichero STL el modelo digitalizado, obteniendo los siguientes resultados:

Printing Statistics	
Estimated Printing Time:	17h:13m:54s
Layer Count:	1919
Total de Lineas:	698989
Filament needed:	30057 mm

Figura 14-3 Resultados en software Repetier Host

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

A continuación, se presenta una tabla ilustrativa con el detalle de los costos:

Tabla 17-3 Costo estimado de prototipado via impresión 3D en software Repetier Host

Detalle	Cantidad	Precio por hora	Subtotal 1	Precio por metro	Subtotal 2	TOTAL
Tiempo estimado de Impresión (h)	17,23166667	\$ 4,50	\$ 77,55	-	-	\$ 79,35
Cantidad estimada de filamento (m)	30,057	-	-	\$ 0,06	\$ 1,80	

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Analizando el costo de prototipado estimado de las prótesis estéticas vía impresión 3D de la misma, se observa que el mismo es bastante bajo comparado con precios comerciales. Además, cuenta con la característica de ser altamente personalizable.

CONCLUSIONES

- La técnica empleada en el proceso de adquisición de imágenes utiliza iluminación estructurada junto con el principio de aislamiento lumínico, otorgándole al sistema una buena capacidad de reducción de ruido, lo cual conlleva a: disminuir los errores presentes en los datos, mejorar el tiempo de escaneado y reducir el coste computacional.
- Se logró dimensionar y construir un prototipo de escáner 3D con características adecuadas para la captura de imágenes correspondientes a la zona delimitada dentro del trabajo de titulación; lo que permite generar modelos tridimensionales de dichas zonas.
- El número de cámaras para la adquisición de imágenes se logró reducir debido a la implementación de un sistema rotatorio, además dicho sistema permite que el objeto a escanear pueda permanecer inmóvil, otorgando facilidad y comodidad para el usuario.
- El software desarrollado logra detectar de manera precisa la forma del objeto escaneado, generando al final del proceso un modelo tridimensional digitalizado con características similares al modelo real.
- El diseño planteado posibilita la construcción de una herramienta de bajo costo en comparación de los sistemas comerciales existentes. La misma cuenta con las características necesarias para desempeñar tareas que faciliten el proceso de modelado y prototipado de prótesis ortopédicas pasivas por debajo del codo.
- En cuanto a los usuarios que carecen de los dos miembros superiores, no habría la posibilidad de escanearlos, sin embargo, la opción que se les puede presentar es la de emplear a una persona con características antropométricas similares.
- El prototipo construido no compite en resolución, pero sí en precisión frente a un equipo comercial acondicionado como escáner 3D. Definiendo a la resolución como la cantidad de detalles que se pueden capturar.

RECOMENDACIONES

- Se debe evitar la iluminación excesiva cerca del dispositivo, para reducir la producción de errores en el proceso de captura de imágenes.
- Para mejorar los parámetros de funcionamiento del prototipo desarrollado se debe realizar mejoras en cuanto al sistema rotacional y buscar la forma de optimizar el desempeño del sistema de captura de datos.
- Debido a la necesidad de que el sistema se encuentre rotando alrededor de la extremidad a digitalizar, se debe cuidar el cable situado en la parte posterior del eje de los posibles atascos que pueda resultar con el tren de engranes instalado junto al mismo.
- Se debe ubicar el miembro a escanear en el centro del sistema, de la mejor manera posible para evitar la generación de huecos o la producción de oclusiones en el modelo resultante luego del proceso de digitalización; ya que, a pesar de las capacidades del algoritmo desarrollado, se requiere que el miembro se encuentre orientado en dirección al eje y.
- El uso de software y hardware no licenciado ha posibilitado el diseño y construcción de un prototipo de bajo costo; sin embargo, el desempeño del mismo se puede mejorar realizando mejoras en cuanto a hardware y mecánica, lo cual conlleva una inversión más fuerte.
- Se debe verificar el espacio en la tarjeta microSD antes de comenzar un proceso de escaneo, para prevenir la interrupción del proceso en transcurso, o la posible pérdida de datos.
- Se debe evitar golpes o la manipulación de los ejes rotatorios, debido a que el sistema se encuentra calibrado según parámetros previamente establecidos y en caso de ser modificados, se debe realizar de nuevo el proceso de calibración.

BIBLIOGRAFÍA

1. **BUDYNAS, Richard G, et al**, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9ª ed. México D.F-México. McGraw-Hill Interamericana,2012. pp.200-210
2. **CALVO, Andrés, MARTÍNEZ, Arley & QUINTERO, Edwin**. “Procesamiento de nubes de puntos por medio de la librería PCL”. *Scienti et Technica* [en línea], 2012, (Colombia) 1(52), pp. 136-142. [Consulta: 2017-03-17]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7893/5073>
3. **CRESPO JULIO, Claudia Marcela & FERNÁNDEZ ZÚÑIGA, Ernesto Javier**. Diseño e Implementación de un Escáner 3D para Modelado Geométrico de Objetos. (tesis). (pregrado). Universidad Autónoma del Caribe, Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Mecatrónica. Barranquilla, Colombia.2014. pp. 20-25. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/1368/TMCT%200011C.pdf?sequence=2>
4. **FITZPATRICK, Angus et al**. “Design of a Patient Specific, 3d Printed Arm Cast”. *KnE Engineering* [en línea], 2017, (United States of America), pp. 135-142. [Consulta: 2017-03-20], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313654100_Design_of_a_Patient_Specific_3D_printed_Arm_Cast
5. **GONZÁLEZ MARCOS, Ana et al**. *Técnicas y Algoritmos Básicos de Visión Artificial*. Logroño-España: Universidad de la Rioja: Servicio de Publicaciones, 2006 pp. 9-20
6. **GUAMÁN GUALPA, Klever Geovanny & SOSA GUZMÁN, Andrés David**. Diseño e Implementación de un Sistema para Digitalización de Objetos en 3D Usando Matlab. (tesis). (pregrado). [En línea]. Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control. Sangolquí, Ecuador. 2013. pp. 20-23. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7703/1/T-ESPE-047599.pdf>

7. **JACKSON, Lee.** Multi Camera Adapter Module for Raspberry Pi. *Arduino Based Camera* [en línea]. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: <http://www.arducam.com/multi-camera-adapter-module-raspberry-pi/>
8. **JAN, Wonkwi, et al.** “Structured-light stereo: Comparative analysis and integration of structured-light and active stereo for measuring dynamic shape”. *Optics and Lasers in Engineering* [en línea], 2013, (United States of America) 51(11), pp. 1255-1264. [Consulta: 2017-03-20], ISSN 1255-1264. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613001528>
9. **KELLY, S et al.** “A review of wrist splint designs for additive manufacture”, *Proceedings of 2015: 14th Rapid Design, Prototyping and Manufacture Conference* [en línea], 2015, (Great Britain). [Consulta: 2017-03-20], Disponible en: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/21144/1/A%20review%20of%20wrist%20splint%20designs%20for%20Additive%20Manufacture.pdf>
10. **KHOSHELHAM, Kourosh & ELBERINK, Sander Oude.** “Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications”. *Sensors* [en línea], 2012, (Suiza) 12(2), pp. 1437-1454. [Consulta: 2017-03-12]. ISSN 1424-8220. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1437>
11. **LV, Zhihua & ZHANG, Zhiyi.** “Build 3D scanner system based on binocular stereo vision”. *Journal of Computers* [en línea], 2012, (China). 7(2), p. 399-404. [Consulta: 2017-02-03]. ISSN 1991-1599. Disponible en: <http://www.jcomputers.us/vol7/jcp0702-13.pdf>
12. **MADUELL I GARCÍA, Eloi.** *Visión Artificial*. Cataluña-España: Universitat Oberta de Catalunya, pp. 9-20
13. **MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, Adrián.** Desarrollo de Prótesis Ortopédicas personalizadas mediante tecnologías Láser Escáner 3D. (tesis). (Maestría). [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Máster Universitario en Ingeniería Geodésica y Cartografía. 2015. pp. 20-25. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: http://oa.upm.es/34108/1/TESIS_MASTER_ADRIAN_MARTINEZ_FERNANDEZ.pdf

14. **Guía descriptiva de ortoprótesis.** Madrid, España. Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad, Centro de Publicaciones. 2011. pp. 200-210
15. **SMAKMAN, Pieter.** “Curatio: Development of a low-cost, dedicated Hand 3d Scanner”, (tesis). (máster). [En línea]. TU Delft University, Dept. Ind. Design, Holanda Meridional, Holanda, 2015. pp. 80-90. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a4202d21-6174-4994-a6ea-828392836c54?collection=education>
16. **STRAUB, Jeremy & KERLIN, Scott.** “Development of a large, low-cost, instant 3D scanner”. *Technologies* [en línea], 2014, (United States of America) 2(2), pp. 76-95. [Consulta: 2017-02-02]. ISSN 2227-7080. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2227-7080/2/2/76>
17. **STRAUB, Jeremy, KADING, et al.** “Characterization of a Large, Low-Cost 3D Scanner”. *Technologies* [en línea]. 2015. (United States of America). 3(1), pp. 19-36. [Consulta: 20 Febrero 2017]. ISSN 2227-7080. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2227-7080/3/1/19>
18. **SZELISKI, Richard.** *Computer Vision: Algorithms and Applications.* New York-United States of America, Springer-Verlag New York, Inc. 2010. pp. 9-20
19. **VILAÇA, João L., et al.** “Calibration procedure for 3D measurement systems using two cameras and a laser line”. *Optics & Laser Technology* [en línea]. 2009. (United States of America). 41(2), pp. 112-119. [Consulta: 20 febrero 2017]. ISSN 0030-3992. Disponible en: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9085/1/sdarticle.pdf>
20. **VOLODINE, Tim.** Point cloud processing using linear algebra and graph theory [En línea]. (tesis). (Doctorado) Katholieke Universiteit Leuven, Lovaina, Bélgica. 2007. pp. 1-22. [Consulta: 2017-02-08]. Disponible en: <https://lirias.kuleuven.be/handle/1979/978>
21. **YÁNEZ CAJAS, José Luis.** Diseño y Construcción de un Escáner Bifocal para la Reconstrucción Visual de Objetos utilizando Procesamiento de Imágenes mediante Filtrado en LABVIEW y MATLAB. (tesis). (pregrado). [En línea]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Carrera de Ingeniería Electrónica. Quito, Ecuador. 2014. pp. 90-100.

[Consulta: 2017-02-02]. Disponible en:
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6861/1/UPS-ST001151.pdf>

22. **WEZLER, Aaron.** Low cost 3D Laser Scanning Unit with application to Face Recognition. (tesis). (pregrado). [En línea]. University of Cape Town. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering. Ciudad del Cabo, Sudáfrica. 2005. pp. 200-201. [Consulta: 2017-02-02]. Disponible en: <http://cs.technion.ac.il/~twerd/Undergrad-2005.pdf>
23. **YOUNG, Hugh et al.** Física universitaria. 12^a. México. Pearson Educación. 2009. pp.200-201
24. **ZAMBUDIO PERIAGO, Ramon & ANDRADE ORTEGA, Juan.** *Prótesis, ortesis y ayudas técnicas*. Barcelona, España. Elsevier Masson 2009. pp. 200-210
25. **ZHANG, Zhengyou.** “Microsoft Kinect Sensor and Its Effect”. *IEEE Multimedia* [en línea], 2012, (United States of America) 19(2), pp. 4-10. [Consulta: 2017-04-06]. ISSN 1070-986X. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee>.

ANEXOS

ANEXO A (Manual de Usuario)



ANEXO 1

MANUAL DE USUARIO DEL ESCÁNER 3D



Henry Lema. Paúl Martínez

MANUAL DE USUARIO DEL ESCÁNER 3D



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

La presente máquina escanea los miembros superiores por debajo del codo de los usuarios. Está compuesta por un sistema mecánico rotatorio, el cual mueve las cámaras alrededor del objeto a escanear y un sistema electrónico cuyo dispositivo principal es un microcomputador Raspberry Pi B3 la cual ejecuta el software de procesamiento de imágenes, para entregar como resultado un modelo digital del miembro escaneado.

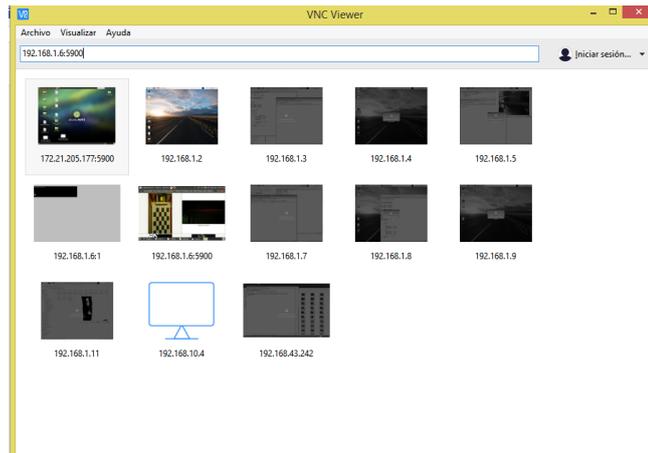
PROCESO DE ESCANEADO

Las etapas a seguir para el proceso de escaneado del miembro de un usuario son:

1. Conectar la Raspberry Pi de forma remota con un ordenador.

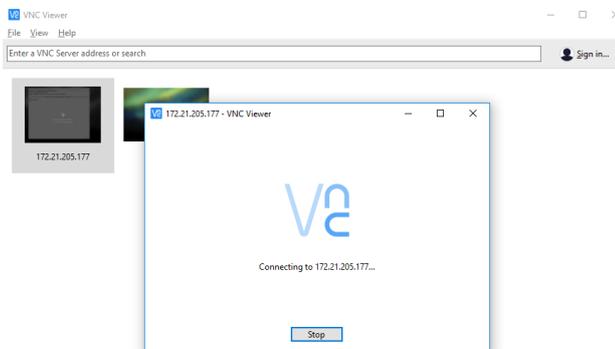
Al estar encendido el escáner, se debe acceder a dispositivo desde un ordenador el cual tenga el software VNC y además se encuentre conectado a la misma red, para lo cual se debe seguir los pasos:

- Abrir el programa VNCViewer en el ordenador.
- Digitar la dirección IP asignada a la Raspberry Pi3, seguida del número de puerto 5900; de la siguiente manera: 192.168.1.50:5900



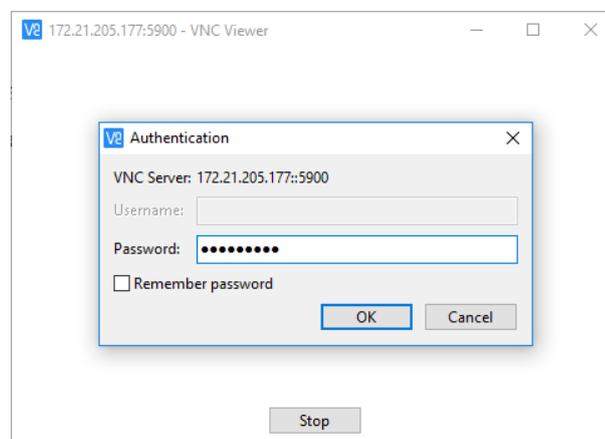
Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

- Presionar la tecla Enter y esperar a que la conexión sea establecida.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

- En ocasiones puede pedir el ingreso de la clave del dispositivo, la cual es: *raspberrypi*. De preferencia dar clic en *Remember password* para que la conexión sea automática en los próximos accesos.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

- Luego de establecida la conexión se podrá visualizar el escritorio de la microcomputadora instalada en el escáner.

Así, nos encontraremos conectados remotamente de una manera rápida y sencilla, posteriormente ejecutamos la aplicación que se encuentra en el escritorio, tal como se ilustra en la siguiente figura:

2. Posicionar al paciente cómodo y centrar su brazo en el dispositivo.

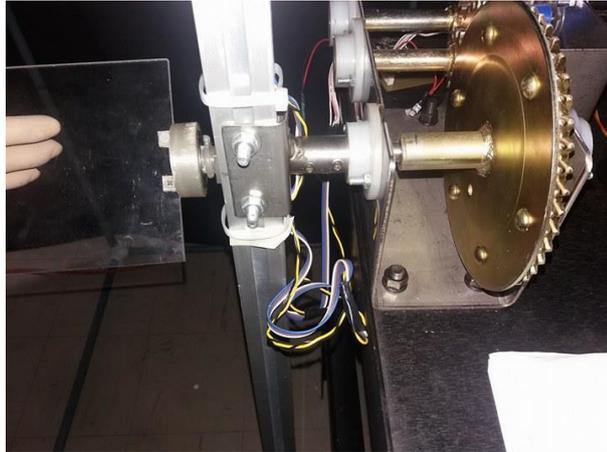
El usuario debe estar sentado de forma cómoda con el fin de evitar cansancio, además, el brazo debe ir sobre la muleta de soporte para prevenir entumecimiento. El miembro a ser escaneado debe ir centrado con referencia al eje del sistema rotatorio con la mano extendida y los dedos juntos los mismos que se deben apoyar sobre el cuadrado de acrílico, para impedir la aparición de oclusiones en el modelo, o la pérdida de datos durante el proceso.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

3. Consideración de cables antes de ejecutar la aplicación

La parte más delicada que se debe considerar antes de la rotación del sistema, es la conexión de los cables de alimentación y señal, ya que los mismos se van enrollando en el eje a medida que el sistema va rotando, para prevenir la ruptura de los mismos, se debe girar manualmente el eje de forma inversa al realizado por el programa. La instrucción de captura de imágenes debe estar detenida y el interruptor del driver de motor en la posición de apagado, luego de cumplir los dos pasos anteriores, la manipulación del eje es permitida.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

4. Ejecutar la aplicación de escaneo.

La ventana de la aplicación consta de seis botones, cada uno con una funcionalidad específica, las cuales son detalladas a continuación:

Calibrar láser: enciende el láser durante 40 segundos, de tal forma que el usuario pueda acomodarse en la máquina y ubicar el miembro de adecuadamente.

Capturar fotos: inicia el proceso de captura de imágenes, además acciona el sistema rotatorio mecánico donde se encuentran las cámaras.

Preparar fotos: rota las imágenes de una cámara, para que puedan ser procesadas en conjunto con las capturadas por la otra cámara.

Procesar fotos: manipula las fotos con el fin de obtener una matriz de datos la cual contiene la información espacial del objeto y los guarda en un archivo con formato ply el cual puede ser procesado en softwares dedicados para nube de puntos.

Salir: cierra la interfaz de la aplicación y finaliza los procesos en ejecución.

Cuadro de texto: sirve para ingresar el nombre de la carpeta o la dirección en donde las imágenes capturadas serán guardadas.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

5. Dar clic en calibrar láser y centrar al usuario y/o al láser.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

6. Una vez listo el usuario, dar clic en capturar fotos, y esperar a que el sistema gire una vuelta completa.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

7. Presionar el botón preparar fotos y esperar a que finalice.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

8. Hacer clic en procesar fotos y esperar un tiempo hasta que la aplicación haya generado el archivo con extensión ply.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

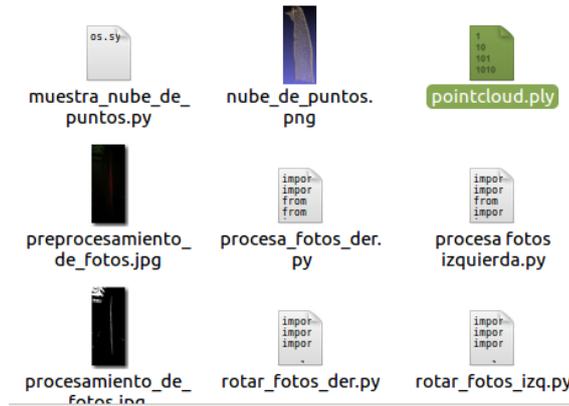
9. Cerrar el programa en caso de así desearlo.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

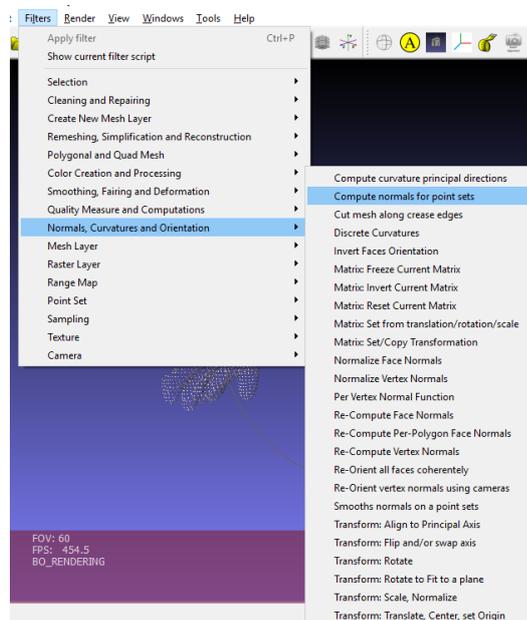
10. Importar el archivo a la computadora que tenga instalado Meshlab.

11. Abrir el archivo en el programa para empezar con el proceso de post-procesamiento.



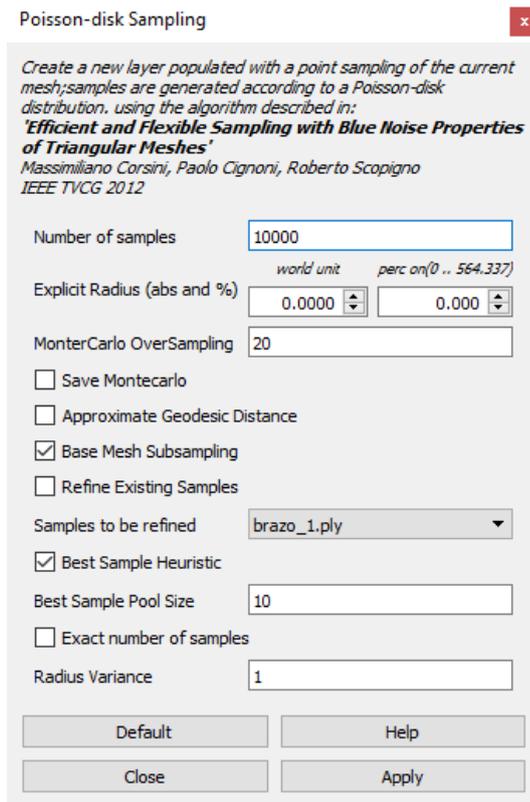
Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

12. Dentro de Meshlab, ir a *Filters*; seleccionar *Normals, Curvatures and Orientation*; dar clic en *Compute normals for point sets*.



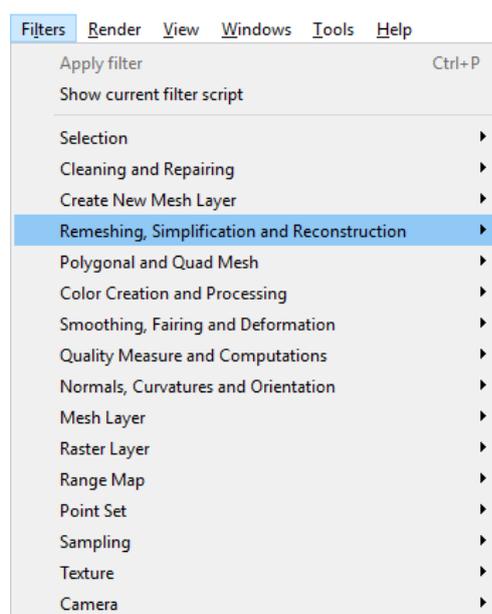
Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

13. Luego se procede al proceso de muestreo, para eso nos dirigimos a *Filters; Sampling; Poisson-disk Sampling*; luego en el nuevo cuadro seleccionamos el número de puntos a generar por lo general se recomienda 10.000, y verificar que la opción *Base Mesh Subsampling* esté seleccionada, para luego dar clic en *Apply*.

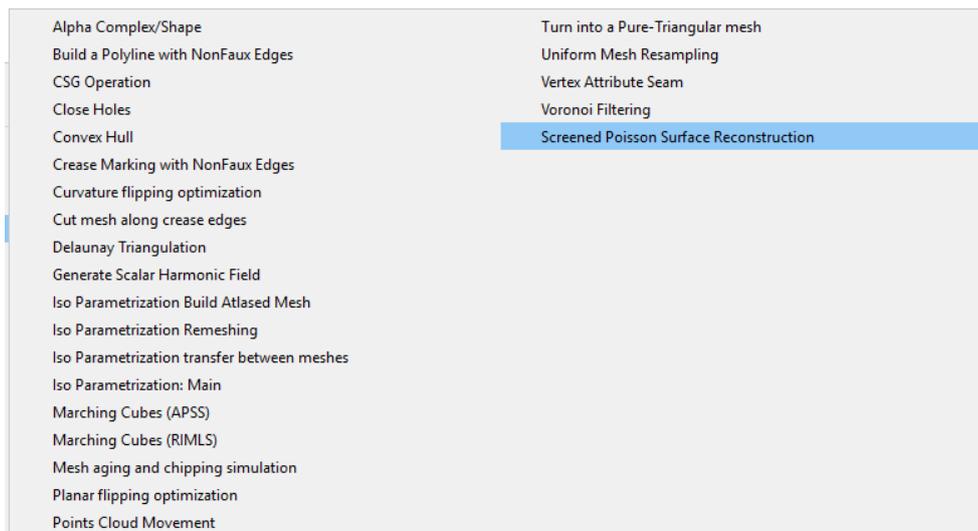


Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

14. Ahora se tiene una nueva nube de puntos, la cual carece de superficies, por lo que se procede a dar clic en *Filters; Remeshing, Simplification and Reconstruction; Screened Poisson Surface Reconstruction*. Lo que generará un sólido.

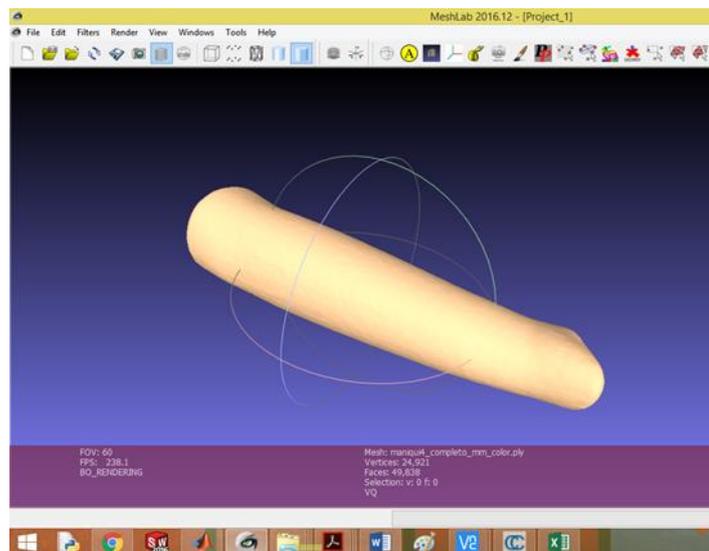


Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017



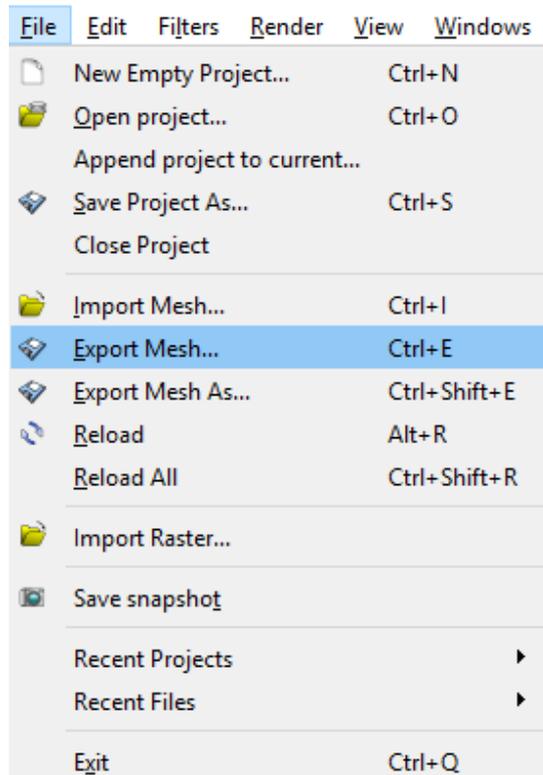
Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

15. Luego de esperar la culminación del proceso, se obtiene el modelo sólido.

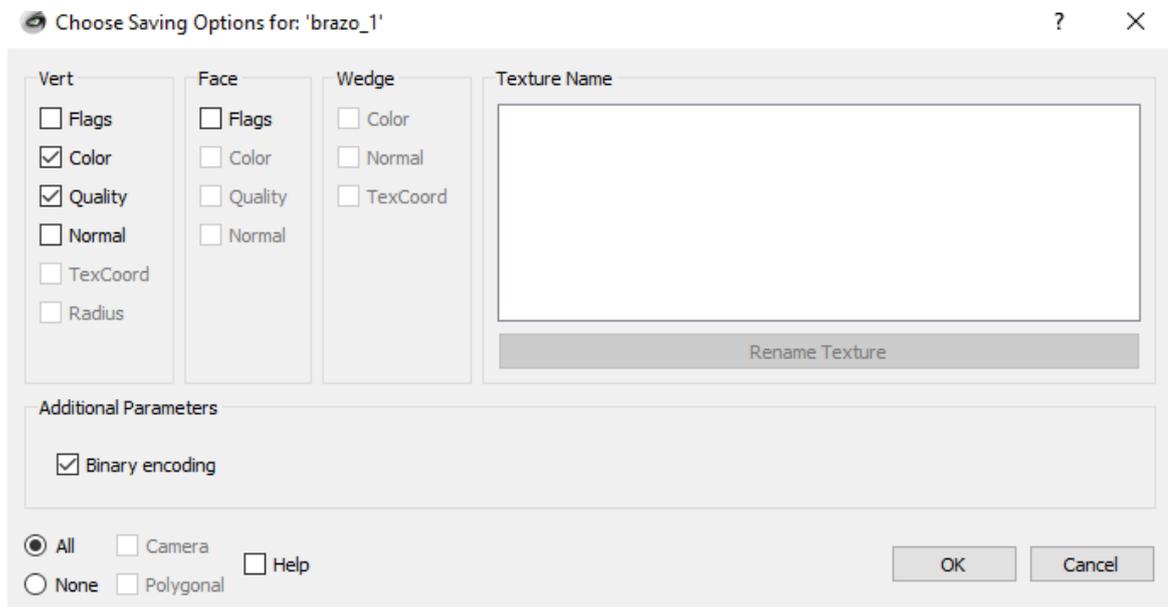


Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

16. Para finalizar se procede a exportar la nube generada, dando clic en *File; Export Mesh;* dar clic en el botón ok de ventana emergente, seleccionar el nombre y dirección del archivo donde se desea almacenar el modelo.



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

ANEXO B
(Evidencias de
Participación en Eventos)

I FERIA DE EMPRENDIMIENTO INDUSTRIAL ESPOCH 2017

El prototipo desarrollado se presentó como parte del proyecto “Sistema de entrenamiento para uso de prótesis mioeléctricas de brazos a través de señales electromiográficas”, presentado por el Grupo de Investigación y Estudios en Bio Ingeniería de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH dentro del cual se conformó un grupo multidisciplinario entre estudiantes y docentes de la Facultad de Informática y Electrónica y de la Facultad de Mecánica para participar dentro de la modalidad de Banco de Ideas. Dentro de dicho proyecto nuestro prototipo ejerce la función de realizar la digitalización del miembro superior para lograr el correcto dimensionamiento de la prótesis a desarrollar. A continuación, se presentan algunas fotografías de la participación en el evento



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Dentro de dicho evento, el proyecto dentro del cual se participó con el prototipo de escáner 3D desarrollado se adjudicó el primer lugar:



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

CONCURSO DE EMPRENDIMIENTO IV SEMANA DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA RIOBAMBA 2017

El prototipo desarrollado se presentó como parte de los proyectos “Férulas ortopédicas impresas en 3D como alternativa para la rehabilitación de extremidades superiores” y “Desarrollo de prótesis mioeléctricas de bajo costo para extremidades superiores”, presentados por el Grupo de Investigación y Estudios en Bio Ingeniería de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH dentro del cual se conformó un grupo multidisciplinario entre estudiantes y docentes de la Facultad de Informática y Electrónica y de la Facultad de Mecánica Dentro de dicho proyecto nuestro prototipo ejerce la función de realizar la digitalización del miembro superior para lograr el correcto dimensionamiento ya sea de las prótesis o de las férulas a desarrollar. A continuación, se presentan algunas fotografías de la participación en el evento



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Dentro de dicho evento, los proyectos dentro de los cuales se participó con el prototipo de escáner 3D desarrollado se adjudicaron Segundo Lugar y Primera Mención Honorífica respectivamente:



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

ANEXO C
(Evidencias de
Postulación para
Participación en Evento
de Publicación de
Artículos Científicos)

CONISOFT 2017: The 5th International Conference on Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT'17)

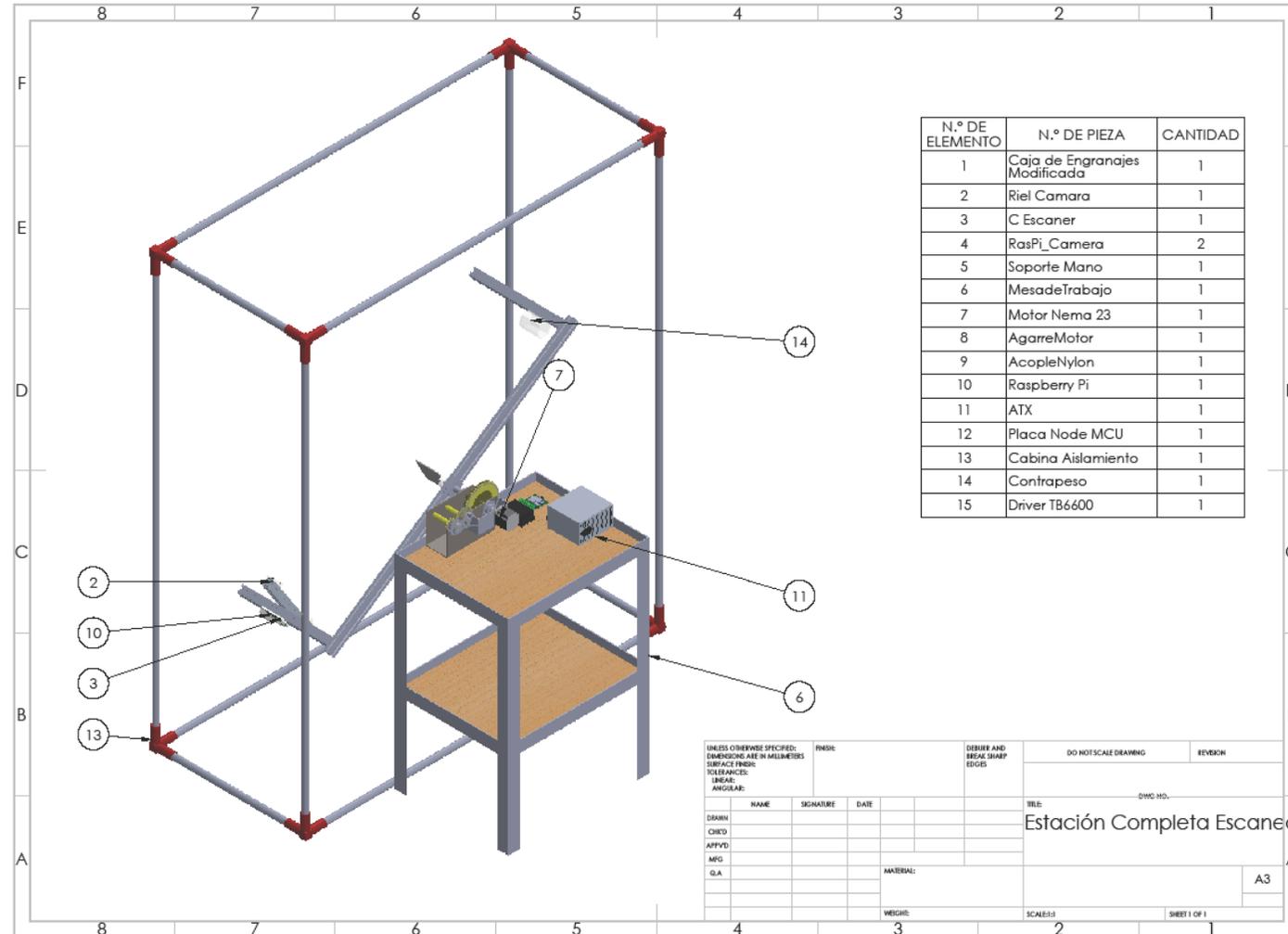
Con base en la documentación y resultados generados durante el desarrollo del trabajo de titulación, se postuló para publicación un artículo científico dentro del evento CONISOFT 2017 en México, con fecha límite de postulación 16 de Junio de 2017. A continuación, se presenta una captura de pantalla del sistema Easy Chair, el cual aloja los datos del artículo enviado para postulación.

Paper 59							
Title:	Diseño e Implementación de un Escáner 3D basado en Visión Artificial Estéreo para el Modelado y Prototipado de Prótesis Ortopédicas Pasivas por debajo del codo						
Paper:							
Track:	Student Research Consortium						
Author keywords:	escáner 3d impresión 3d nube de puntos visión artificial prótesis pasivas						
Abstract:	En la actualidad la tecnología 3d orientada a la impresión y escaneo de objetos presenta buenas prestaciones, lo cual ha permitido la construcción de infinidad de prototipos en diferentes áreas, siendo uno de los más destacados, diseño de prótesis de brazo, este último presenta una desventaja en cuanto al tamaño con relación al usuario, ya que no todas las personas tienen las mismas características físicas. Debido a esto, se realiza el presente trabajo el cual consiste en la construcción de un prototipo de escáner 3d, con el propósito de digitalizar los miembros superiores por debajo del codo de tal forma, que se tenga un modelo computarizado con medidas, lo más cercanas a las reales, el mismo que facilitará la etapa de diseño y construcción de las prótesis pasivas de brazo.						
Time:	Jun 19, 01:16 GMT						
Author conflicts:	none						
Authors							
first name	last name	email	country	organization	Web page	corresponding?	
Henry Paúl	Lema	henrylema94@hotmail.com	Ecuador	Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales - ESPOCH		✓	
Paúl Nicolai	Martínez	paulmartinez1991@gmail.com	Ecuador	Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales - ESPOCH			
Jorge Luis	Paucar	jpaucar@esPOCH.edu.ec	Ecuador	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo			
Jorge Vicente	Yuquilema	juquilema@esPOCH.edu.ec	Ecuador	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo			
Javier J.	Gavilanes	javier.gavilanes@esPOCH.edu.ec	Ecuador	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo		✓	

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

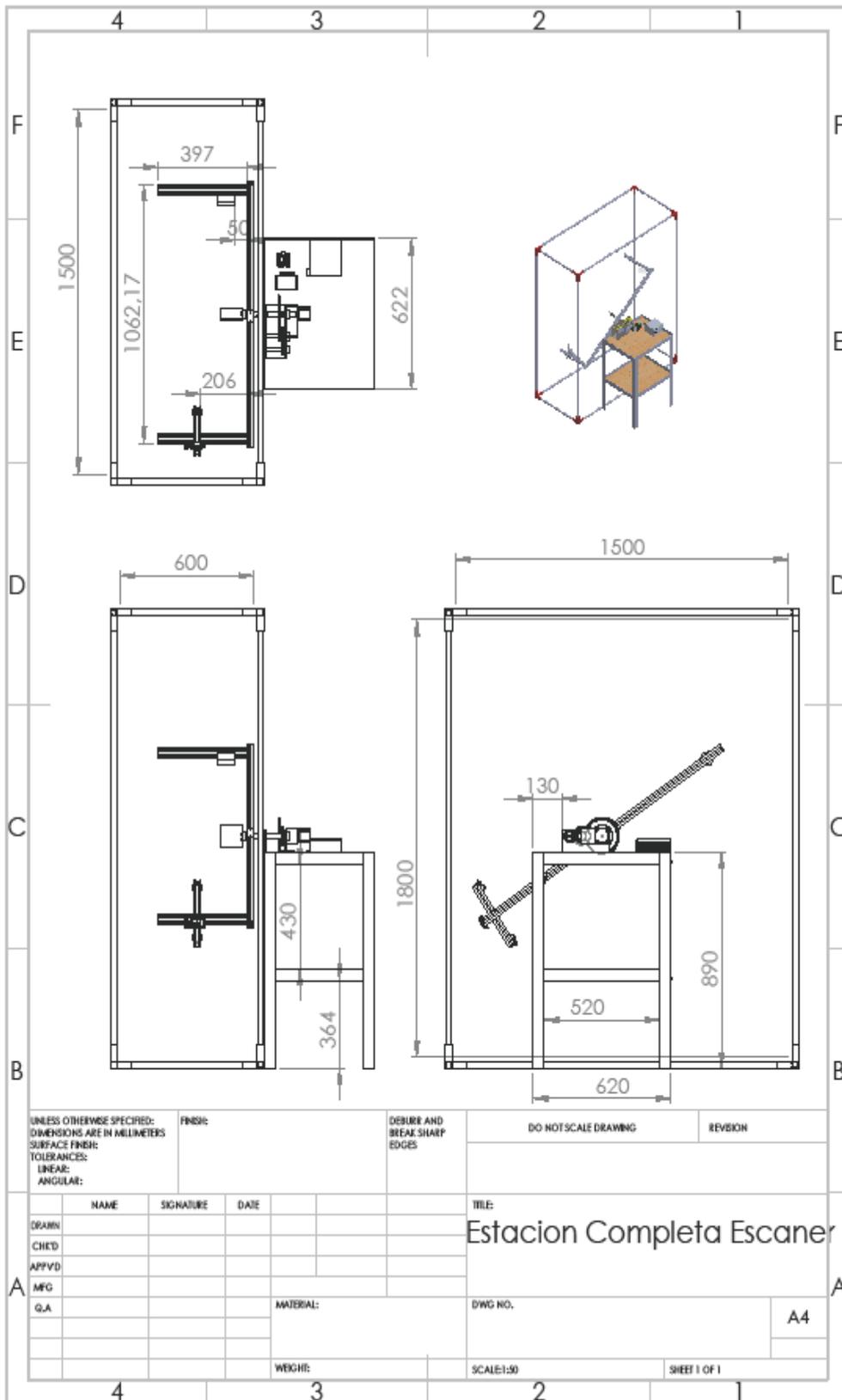
ANEXO D
(Planos Estructurales
Mecánicos)

VISTA GENERAL DEL PROTOTIPO DE ESCÁNER 3D



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Caja de Engranajes Modificada	1
2	Riel Camara	1
3	C Escaner	1
4	RasPi_Camera	2
5	Soporte Mano	1
6	MesadeTrabajo	1
7	Motor Nema 23	1
8	AgarreMotor	1
9	AcopleNylon	1
10	Raspberry Pi	1
11	ATX	1
12	Placa Node MCU	1
13	Cabina Aislamiento	1
14	Contrapeso	1
15	Driver TB6600	1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:					
TOLERANCES:					
LINEAR:					
ANGULAR:					
NAME	SIGNATURE	DATE		DWG. NO.	
DESIGN				Estación Completa Escaneo	
CHECK					
APPROV					
MFG					
G.A.					A3
			MATERIAL:		
			WEIGHT:	SCALE: 1:1	SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN			
CHECKED			
APPROVED			
MFG			
Q.A.			

TITLE:
Estacion Completa Escaner

DWG NO. A4

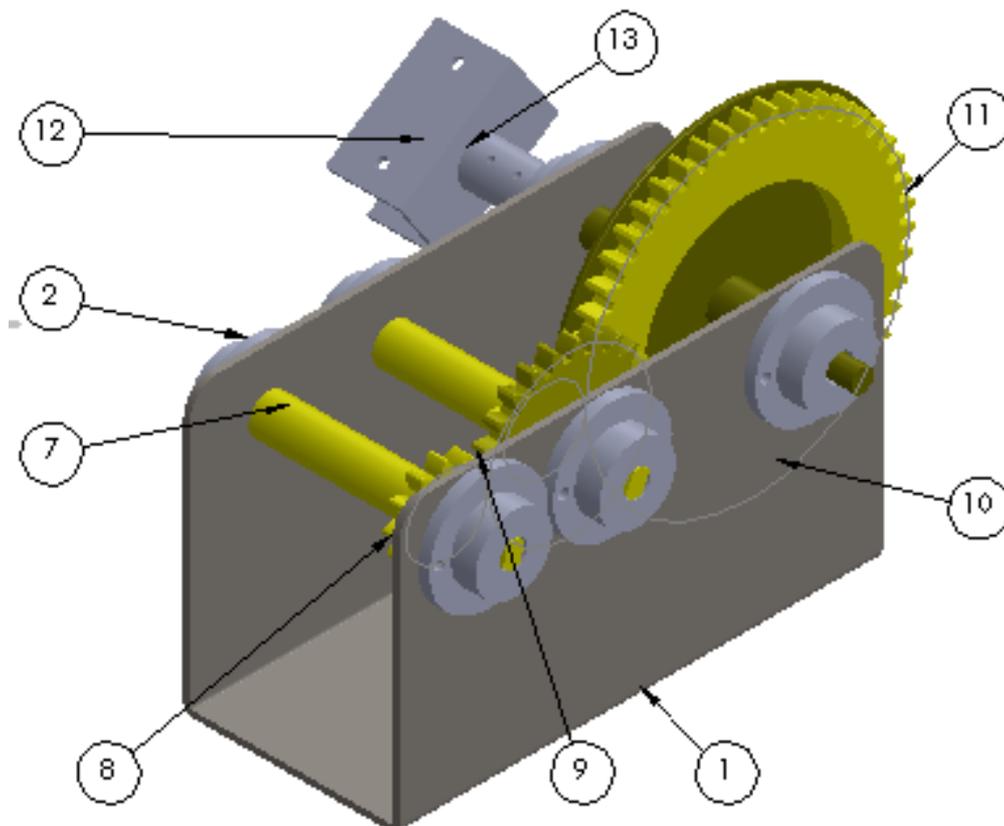
SCALE: 1:50 SHEET 1 OF 1

MATERIAL:

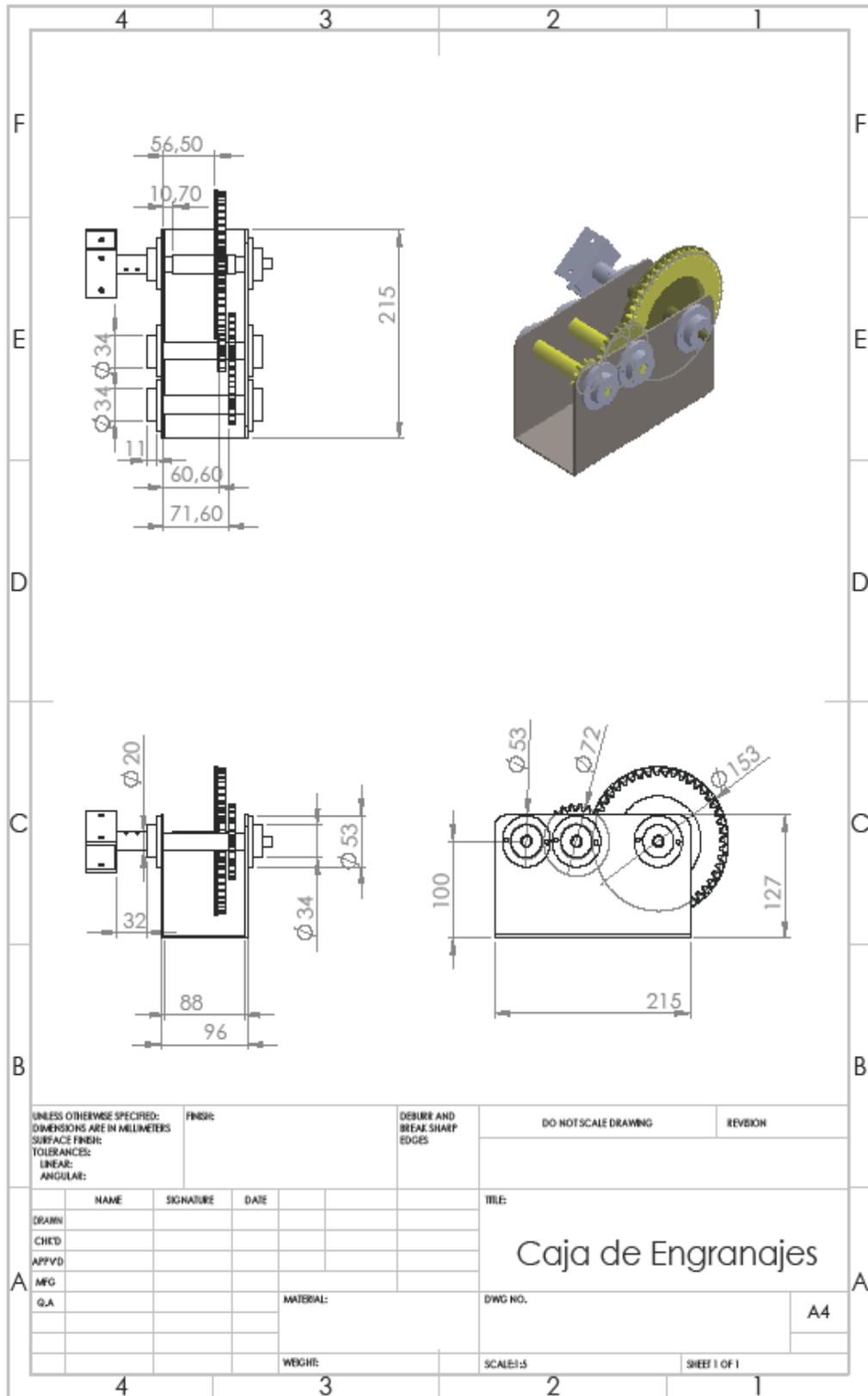
WEIGHT:

VISTA GENERAL DEL TREN DE ENGRANAJES

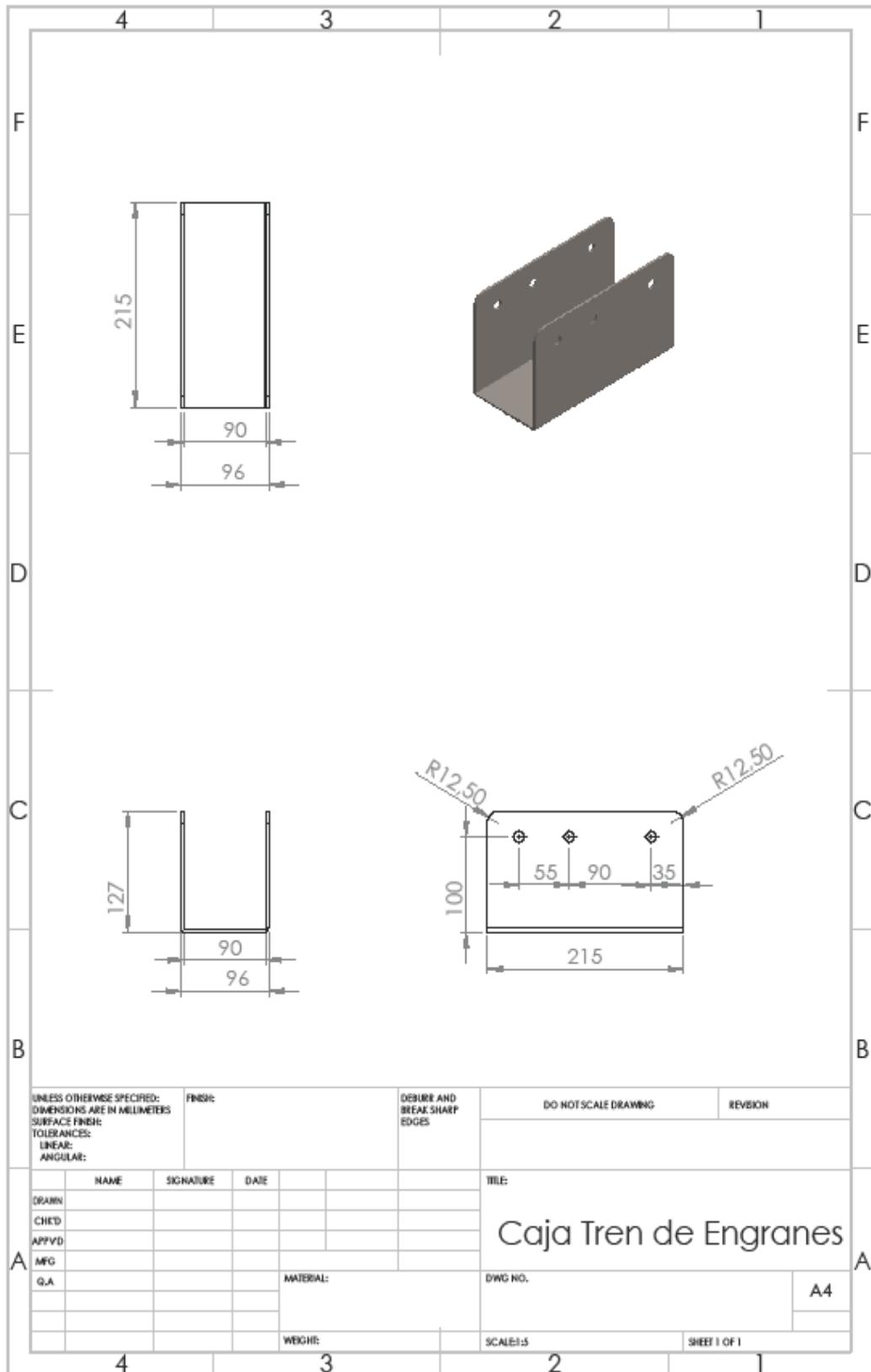
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Caja Tren de Engranajes	1
2	Chumacera	6
3	Anillo Abierto 10mm	6
4	Anillo Interno 10mm	6
5	Engranaje 10mm	12
6	Esfera 10mm	48
7	Eje engrane simple final	2
8	Engranaje 12 dientes_V2	2
9	Engranaje 24 dientes_V2	1
10	Carrete Modificado Final	1
11	Engranaje 48 dientes_V2	1
12	U brazo C	1
13	Acople Barra	1



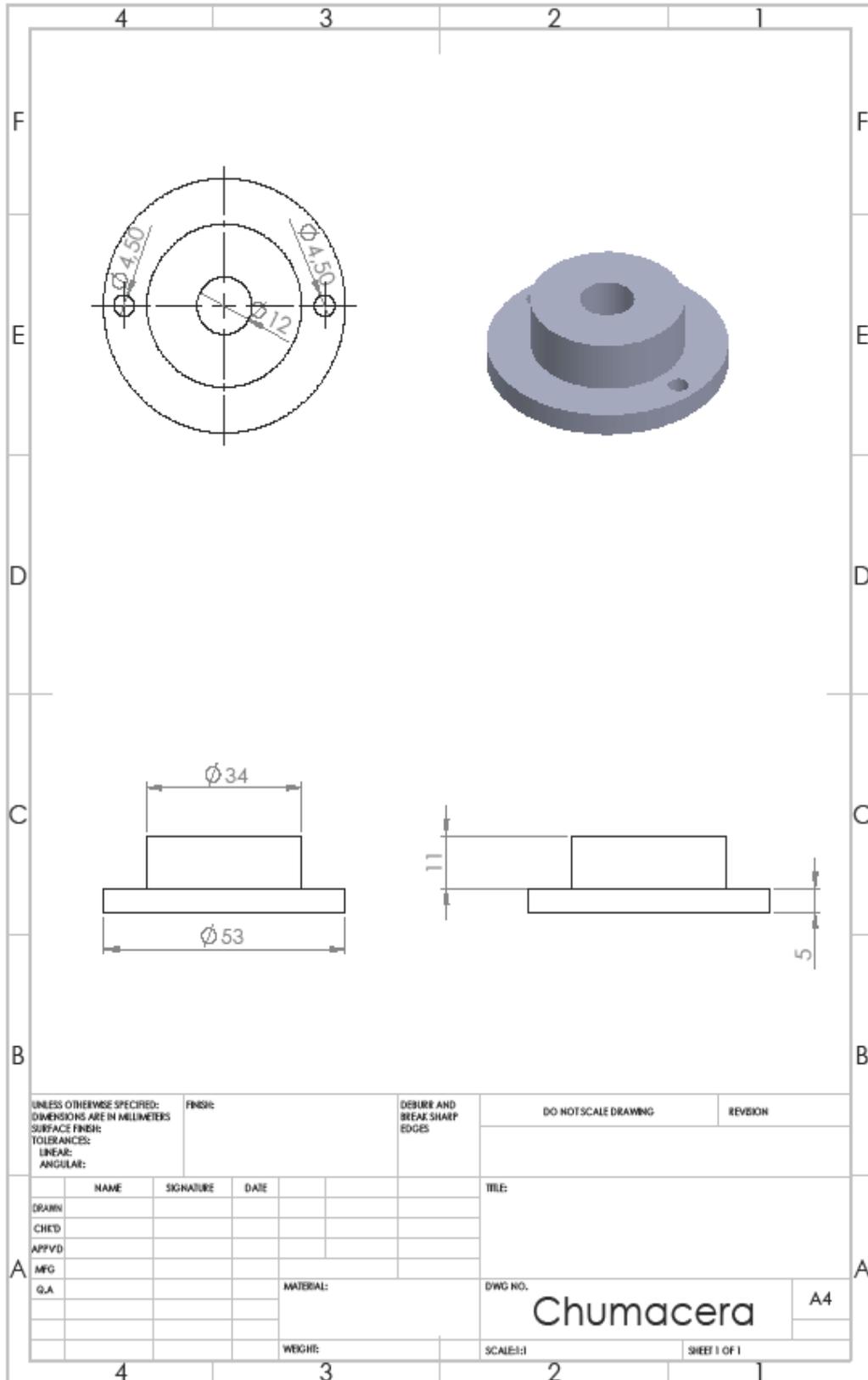
Tren de Engranes



Caja para tren de engranajes



Chumacera

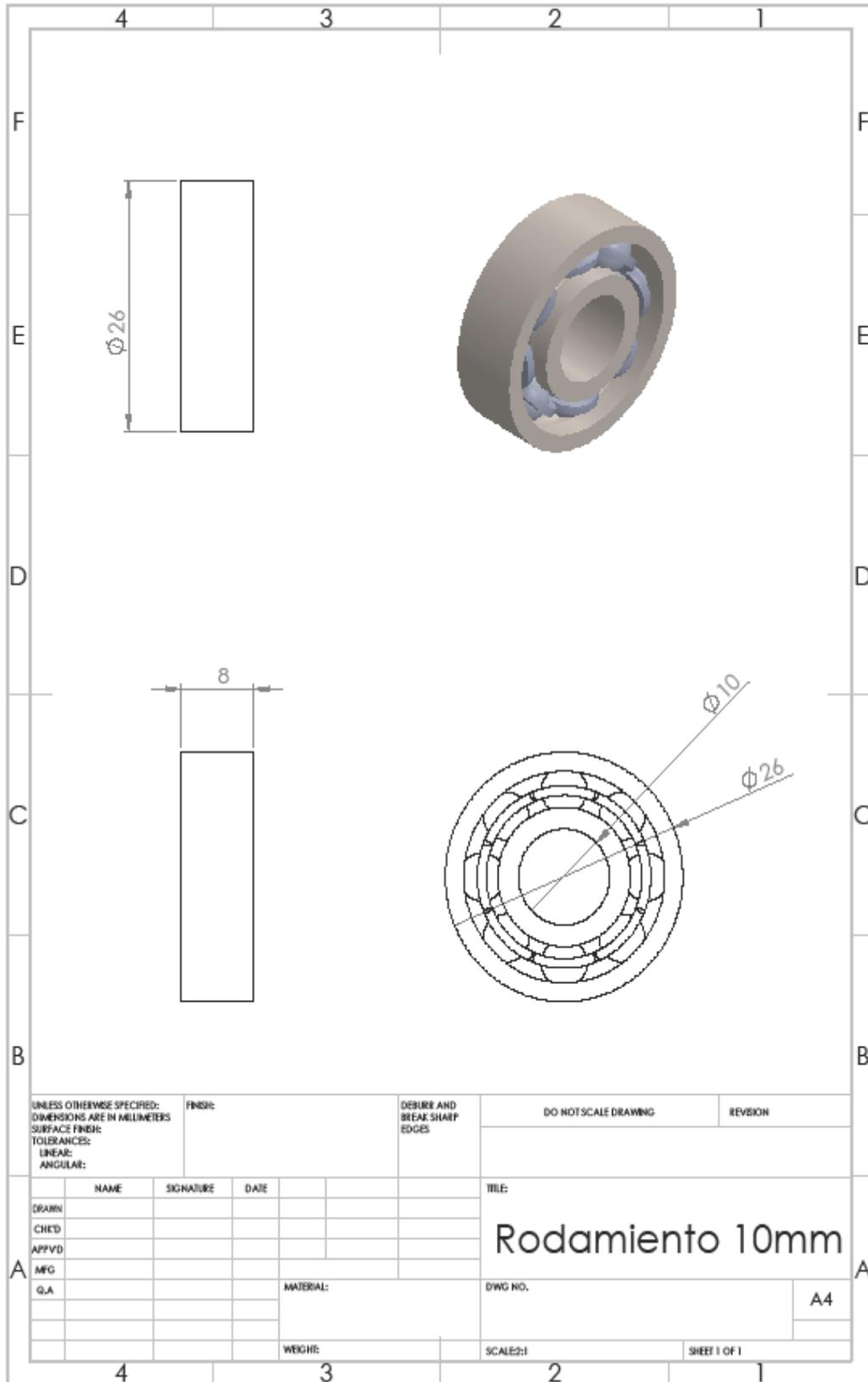


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRWN						
CHKD						
APPVD						
MFG			MATERIAL:		DWG NO.	
G.A.					Chumacera	
		WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1

A

A

Rodamiento 10mm



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A.			

TITLE:

Rodamiento 10mm

DWG NO.

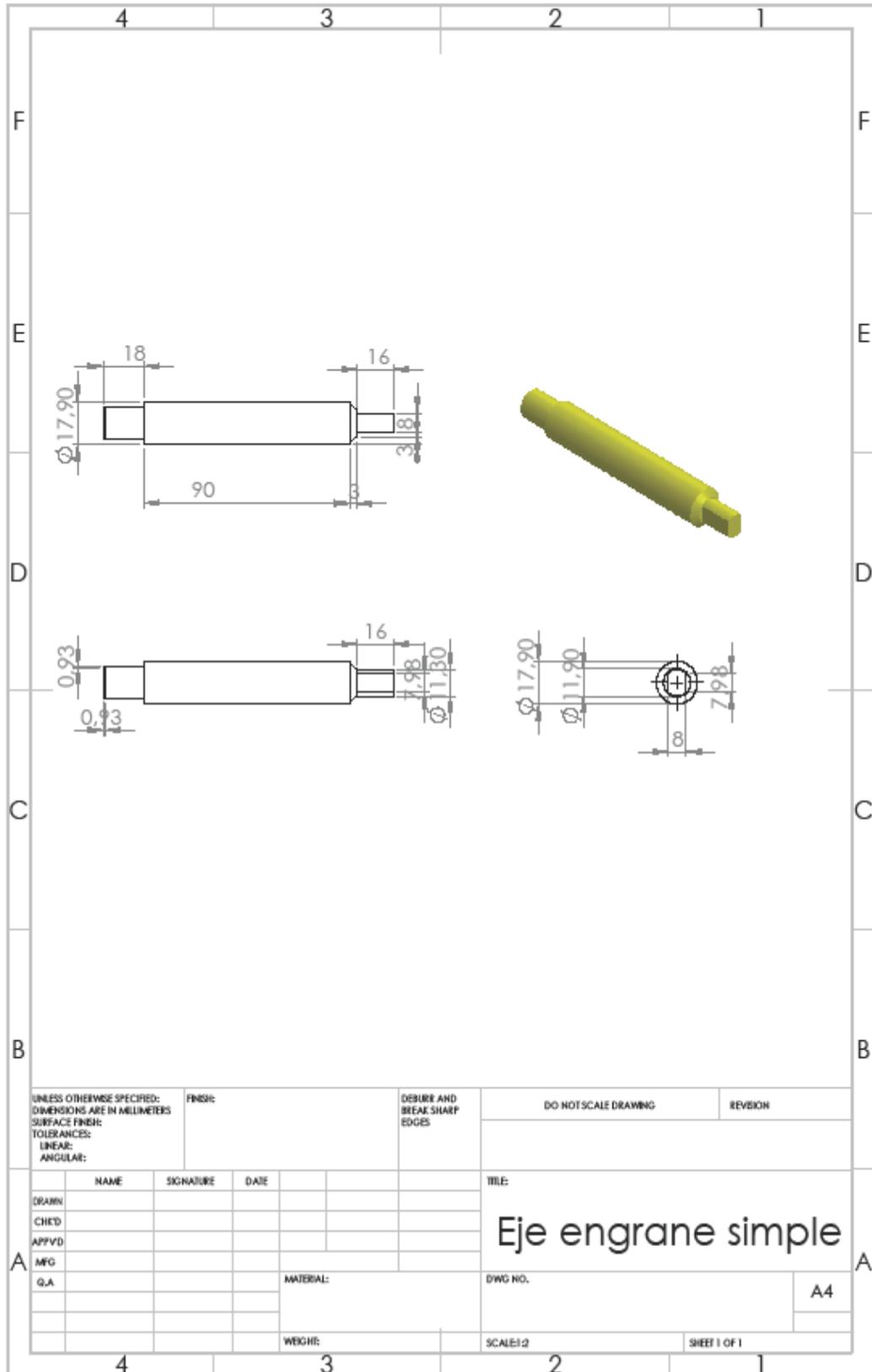
A4

WEIGHT:

SCALE:1

SHEET 1 OF 1

Eje engrane simple



ANEXO E

(Diagrama Esquemático
de Control)

Tabla Ilustrativa de Conexiones Raspberry PI3 y componentes adicionales

Pin Raspberry PI3	Pin Correspondiente en Componentes Adicionales
GPIO5	Entrada señal activación (shield láser)
GND	GND (shield láser)
+5V	+5V (shield láser)
GPIO 13	D5 (Placa Node MCU)
GPIO 19	D6 (Placa Node MCU)
GPIO 26	D7 (Placa Node MCU)
GND	GND (Placa Node MCU)
GPIO 7	Selection (Tarjeta Multicamera Adapter)
GPIO 11	Enable 1 (Tarjeta Multicamera Adapter)
GPIO 12	Enable 2 (Tarjeta Multicamera Adapter)
GND	GND (Tarjeta Multicamera Adapter)

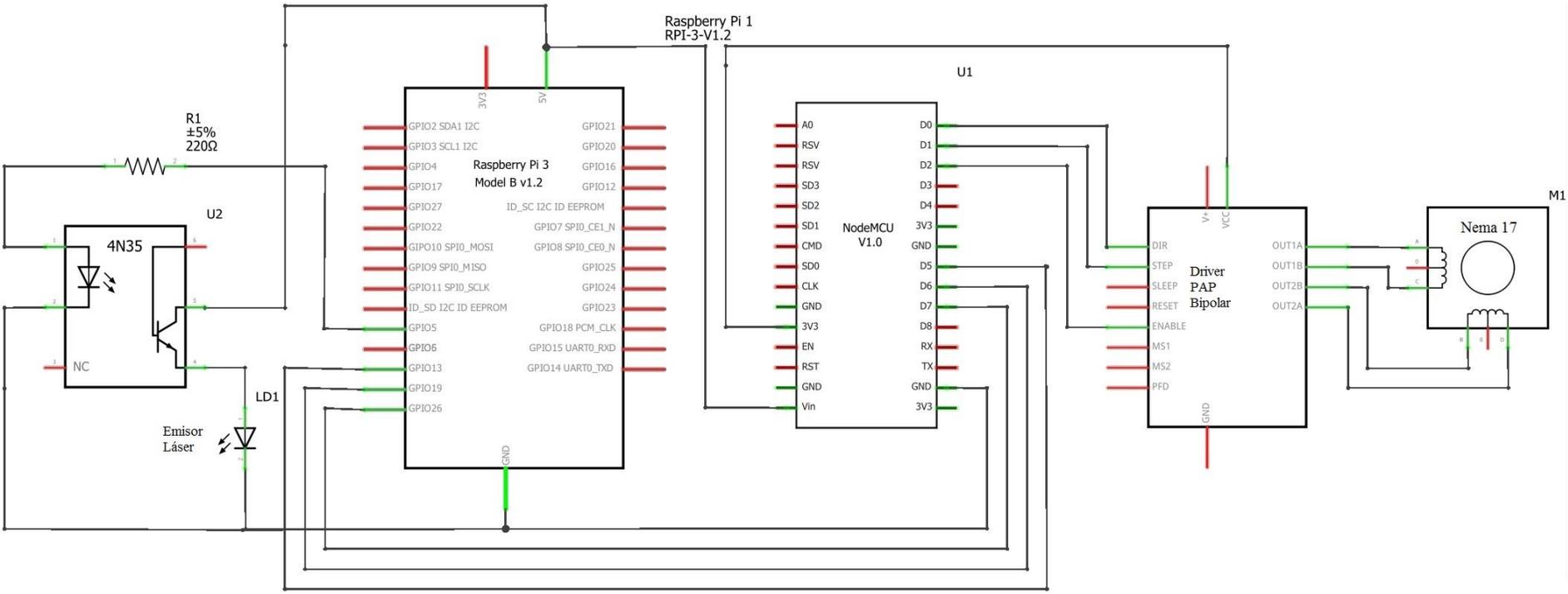
Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Tabla Ilustrativa de Conexiones Node MCU y Driver TB6600

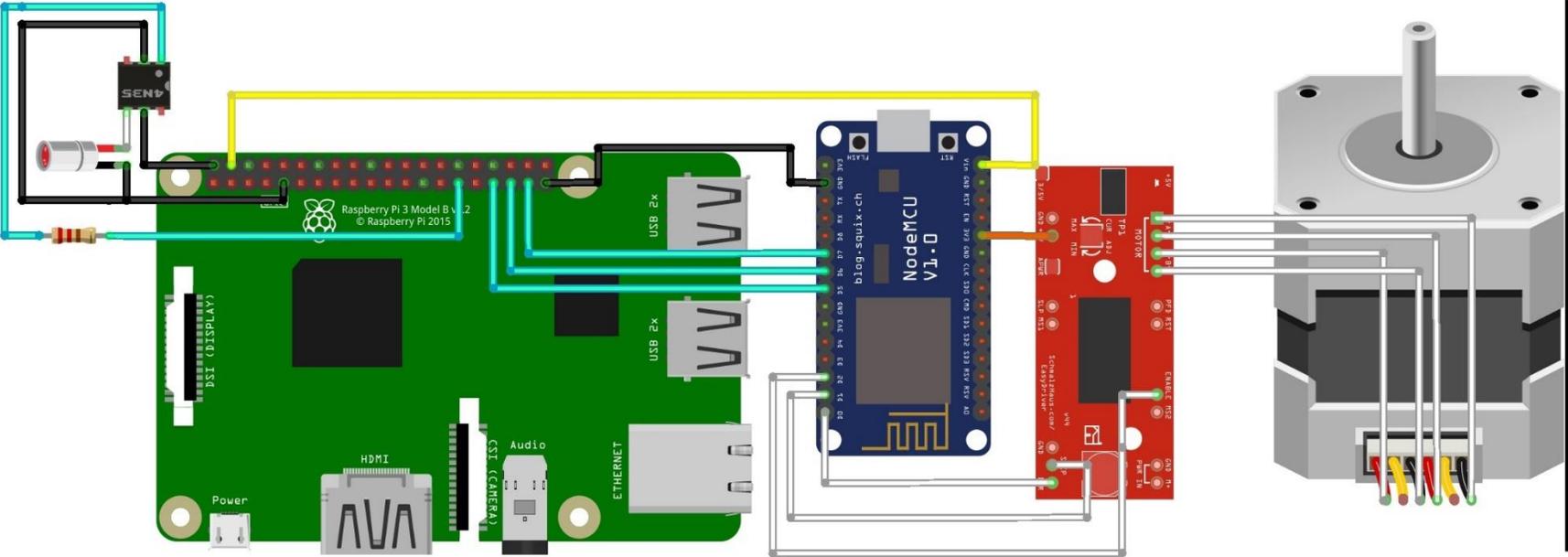
Pin Node MCU	Pin Driver TB6600
+3V3	+VCC
D0	PUL
D1	DIR
D2	ENABLE

Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017

Diagrama Esquemático



Vista en 3D



ANEXO F (Fotografías Proceso de Impresión 3D)

Fotografías proceso de Impresión en 3D



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017



Realizado por: Lema, H. Martínez, P. 2017