



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE
MUESTRAS PARA LA PLATAFORMA ROBÓTICA DE EXTERIORES
PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE MANUFACTURA DEL
DECEM.**

AUTOR: CAIZA COLLAGUAZO EDWIN ORLANDO

DIRECTOR: AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS INTEGRADO A LA PLATAFORMA ROBÓTICA DE EXTERIORES PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE MANUFACTURA DEL DECEM" fue realizado por el señor Caiza Collaguazo Edwin Orlando, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de agosto del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Dr. Wilber Geovanny Aguilar, ubicada sobre una línea horizontal que sirve como base para el nombre y cargo.

Dr. Wilber Geovanny Aguilar
DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Caiza Collaguazo Edwin Orlando, con cédula de identidad N° 1724817729 declaro que este trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS INTEGRADO A LA PLATAFORMA ROBÓTICA DE EXTERIORES PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE MANUFACTURA DEL DECEM" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 24 de agosto del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser 'Edwin Caiza'.

Edwin Orlando Caiza Collaguazo

CC. 1724817729



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

AUTORIZACIÓN

Yo, Caiza Collaguazo Edwin Orlando, con cédula de identidad N° 1724817729, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS INTEGRADO A LA PLATAFORMA ROBÓTICA DE EXTERIORES PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE MANUFACTURA DEL DECEM" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 24 de agosto del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Edwin Caiza'.

Edwin Orlando Caiza Collaguazo

CC. 1724817729

Dedicatoria

El trabajo está dedicado a mi familia quienes con apoyo incondicional hicieron posible la culminación esta etapa de mi vida.

Orlando

Agradecimiento

Agradezco a mis padres que con su apoyo y consejos me permitieron continuar en los momentos más difíciles, a mis hermanos ya que gracias a ellos encontré el valor para seguir adelante sin decaer, su apoyo fue y sigue siendo fundamental en mi vida.

A mis compañeros de la Universidad, que durante el trayecto de la carrera se volvieron mis mejores amigos, Freddy, Santiago, Jona con quienes trabajamos como un verdadero equipo, apoyándonos en momentos difíciles, y con quienes he tenido buenos momentos para recordar.

Como no agradecer a mi director de tesis Dr. Wilbert Aguilar y a MSc. David Loza, por todos sus consejos y constantes ayudas que brindaron al presente trabajo.

Orlando

Índice general

Certificado del director.....	i
Autoría de responsabilidad.....	ii
Autorización	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Planteamiento del Problema.....	6
1.4. Justificación e importancia.....	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Alcance.....	8
1.7. Estructura del documento.....	9
Capítulo 2	10
2.1. Marco Teórico	10
2.2. Robots Industriales	10
2.3. Tipos de Robots Industriales	11
2.4. Robot antropomórfico	12
2.5. Robot Híbrido.....	13
2.6. El proceso de manipulación	14
2.6.1. Desarrollo de manipuladores	15

2.7. Percepción de Entornos	16
2.7.1. Percepción mediante visión 3D	17
2.8. Sensor Kinect	20
2.8.1. Kinect como sistema de Visión Artificial.....	21
2.8.2. Resolución del sensor IR:	22
Capítulo 3	24
3.1. Diseño de robot manipulador de objetos para la plataforma robótica.....	24
3.2. Matriz de la calidad	25
3.2.1. Definición de necesidades.....	25
3.2.2. Definición de características técnicas	26
3.2.3. QFD.....	26
3.3. Factibilidad y planeación	28
3.3.1. Estructura funcional	28
3.4. Subsistema 1. Estructura del Robot Manipulador	31
3.4.1. Modelado de la estructura.....	31
3.4.2. Diseño y selección de componentes de la Base	42
3.4.3. Análisis de volcamiento en la Estructura.....	48
3.4.4. Selección de cojinete para el eje motriz de la base del robot.....	50
3.4.5. Diseño del Manipulador.....	52
3.5. Subsistema 2. Sistema Potencia	60
3.5.1. Dinámica de robot con Euler Lagrange	60
3.5.2. Selección de Actuadores	68
3.6. Subsistema 3. Control del Sistema.....	82
3.6.1. Tipo de microcontrolador	82

3.6.2. Medio de Transmisión de Datos	84
3.6.3. Diseño final de la Tarjeta de control.....	85
3.7. Subsistema 4. Sistema de Visión Artificial	86
3.7.1. Desarrollo del algoritmo de visión artificial	86
3.8. Subsistema 5. Posicionamiento del Robot	91
3.8.1. Posicionamiento Inicial.....	91
3.8.2. Cinemática Inversa aplicado a Robot Antropomórfico de 6 GDL	93
3.8.3. Algoritmo de control.....	100
3.9. Subsistema 6. Sistema Interfaz Humano-Máquina (HMI).....	103
3.9.1. Ordenamiento de elementos del HMI.....	104
3.9.2. Arquitectura y funcionamiento	104
3.10. Concepto Final	105
3.11. RESUMEN.....	106
Capítulo 4.....	108
4.1. Construcción e Implementación.....	108
4.2. Construcción y ensamble del robot manipulador.....	108
4.2.1. Construcción de la base	108
4.2.2. Construcción y ensamblaje del bastidor del robot manipulador.....	109
4.3. Implementación del sistema de Visión Artificial.....	113
4.3.1. Calibración del dispositivo Kinect y obtención de las coordenadas xz y la profundidad	115
4.4. Pruebas y resultados	117
4.4.1. Capacidad máxima del brazo robótico al levantar objetos	117
4.4.2. Repetitividad.....	118

4.4.3. Precisión de visión artificial del sensor Kinect.....	119
4.4.4. Precisión al llegar a la posición dentro del área de trabajo.....	121
4.5. Alcances y Limitaciones	123
4.6. Resumen.....	124
Capítulo 5.....	125
5.1. Conclusiones, recomendaciones y trabajos.....	125
5.1.1. Conclusiones.....	125
5.1.2. Recomendaciones:	125
5.1.3. Trabajos futuros	126
Bibliografía.....	127
ANEXOS:.....	130
ANEXO A Mecánica	130
ANEXO B Pruebas.....	136
ANEXOS C Planos	147

Índice de Figuras

Figura 1 iRAP Robot.....	2
Figura 2 Rover Curiosity.....	2
Figura 3: Robot móvil MITNATOR.....	3
Figura 4 Robot desactivador de bombas	4
Figura 5 (a) Router y (b) cámara web en la plataforma.....	4
Figura 6 Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado (a) vista superior (b) vista del mapa generado y (c) fusión para comparación del mapa.....	5
Figura 7 Robot antropomórfico.....	8
Figura 8 Configuración de un robot antropomórfico.....	13
Figura 9 Aplicación de robots híbridos. a) Robo Sally desactivador de b) Robot extintor Scarab Vulcain.....	14
Figura 10 Fases de un proceso de manejo y sus condiciones ambientales	15
Figura 11 Desarrollo de grippers Fuente: (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005).....	15
Figura 12 Pinza desarrollada para la manipulación de elementos delicados	16
Figura 13 Cinco configuraciones típicas de captura con múltiples Kinect.....	17
Figura 14 Muestra de enfoque de captura con estereoscopia.....	18
Figura 15 Nube de puntos 3D recolectada por los sensores.....	19
Figura 16 Google Car y mapa 3D generado.....	19
Figura 17 Reconocimiento de objetos.....	20
Figura 18 Kinect de Microsoft.....	21
Figura 19 Diagrama de funcionamiento de la calibración de Kinect.....	22
Figura 20 Puntos de luz proyectados por el sensor IR.....	23
Figura 21 Rangos de visión en Kinect.....	23
Figura 22 Matriz del sistema de recolección de muestras propuesto.....	27
Figura 23 Concepto posicionamiento de sistema de recolección de muestras.....	30
Figura 24 Base del Robot Manipulador	32
Figura 25 Diagrama de cargas en la estructura base.....	32
Figura 26 Reacciones y momentos en el plano y-z.....	32

Figura 27 Diagrama de cargas en la estructura base plano x-z	33
Figura 28 Reacciones y momentos en el plano y-z.....	33
Figura 29 Características del perfil seleccionado para la base del robot	35
Figura 30 Acoples para la articulación de la base y codo	36
Figura 31 Eslabón antebrazo del robot manipulador	36
Figura 32 Diagrama de fuerzas en el eje motriz de la base.....	42
Figura 33 Diagrama de Fuerzas Tangenciales	43
Figura 34 Diagrama de Fuerzas Radiales.....	43
Figura 35 Fuerza y momento tangencial hombro eje a	44
Figura 36 Fuerza y momento radial hombro eje a	44
Figura 37 Análisis de Volcamiento.....	49
Figura 38 Fuerzas presentes en los rodamientos de la base	50
Figura 39 Mecanismo Subactuado para manipulador	53
Figura 40 Mecanismo por polea y cable.	54
Figura 41 Mecanismo compuesto por engranajes cónicos.....	55
Figura 42 Efector final del robot manipulador.....	57
Figura 43 Esquema con theta 1	62
Figura 44 Esquema con theta2 y theta3 para el cálculo de Euler-Lagrange	63
Figura 45 Diagrama de bloques del modelo	67
Figura 46 Respuesta theta1 del modelo a un T1= 28 Nm	67
Figura 47 Respuesta theta2 del modelo a un T2= 16 Nm.....	68
Figura 48 Respuesta theta3 del modelo a un T3= 12 Nm.....	68
Figura 49 Diagrama de fuerzas que intervienen en el Gripper	70
Figura 50 Esquema de fuerzas de contacto cuando el manipulador toma un objeto	71
Figura 51 Esquema del Mecanismo	72
Figura 52 Momento de inercia para el Motor 1	74
Figura 53 Articulación entre la muñeca y el Gripper del robot manipulador	76
Figura 54 Radio de giro para el motor 2 en la muñeca del robot.....	77
Figura 55 Momento de inercia para el motor 3.....	77
Figura 56 Radio de giro para el motor 4	78

Figura 57 Ubicación de los motores.....	81
Figura 58 Esquema de conexión de la tarjeta de control	85
Figura 59 Máscara en formato HSV obtenido con la Kinect	87
Figura 60 Operaciones realizadas para a conversión de RGB a HSV	88
Figura 61 Captura de la posición del objeto por color	88
Figura 62 Algoritmo del sistema de control de visión artificial.....	89
Figura 63 Esquema para la transformación de pixeles a cm del entorno.....	90
Figura 64 Ángulos de posicionamiento inicial.....	92
Figura 65 Esquema de los parámetros para el posicionamiento del robot.....	92
Figura 66 Matriz de transformación de la posición inicial del manipulador	93
Figura 67 Posicionamiento inicial del robot manipulador de objetos.....	93
Figura 68 Esquema ángulo de la base.....	94
Figura 69 Configuración CODO ARRIBA (a) Configuración CODO ABAJO (b)	95
Figura 70 Configuración CODO ARRIBA (a) Configuración CODO ABAJO	96
Figura 71 Esquema de la articulación 4 robot.....	97
Figura 72 Esquema de la articulación 5 robot.....	98
Figura 73 Esquema de la articulación 6 robot.....	99
Figura 74 Algoritmo de posicionamiento del robot recolector de objetos.....	102
Figura 75 Boceto de distribución del HMI	104
Figura 76 Concepto final del robot recolector de muestras	105
Figura 77 Soldado de los perfiles para conformar la estructura base	108
Figura 78 Colocación de ángulo de refuerzo	108
Figura 79 Preparación de la base antes de montar el robot.....	109
Figura 80 Pieza generada el código G para imprimirla en 3D.....	109
Figura 81 Impresión de la pieza base en impresora 3D	110
Figura 82 Identificación de piezas	110
Figura 83 Probar que los motores encajen perfectamente	111
Figura 84 Maquinado de los acoples de los motores de la base ASMC03B.....	111
Figura 85 Reducción de eje del motor ASMC03B para el acople	111
Figura 86 Perfil de aluminio como eslabón	112

Figura 87 Construcción del brazo completo	112
Figura 88 Manipulador realizado en corte láser.....	112
Figura 89 Chumaceras UCF204 empernadas.....	113
Figura 90 Fijación del brazo manipulador a la base metálica.....	113
Figura 91 Dispositivo Kinect 360	114
Figura 92 Colocación del sensor Kinect	114
Figura 93 Esferas de espuma de poliuretano verde y amarilla.....	115
Figura 94 Calibración de Kinect con RTABMAP	116
Figura 95 Pruebas de reconocimiento de objetos y su posición.....	116
Figura 96 Prueba de reconocimiento de formas.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de los Robots Industriales</i>	11
Tabla 2 <i>Requerimientos o necesidades del consumidor</i>	25
Tabla 3 <i>Especificaciones técnicas del proyecto</i>	26
Tabla 4 <i>Escala japonesa de correlación entre requerimientos</i>	27
Tabla 5 <i>Resultados de la matriz QFD</i>	28
Tabla 6 <i>Subsistemas definidos para el diseño</i>	29
Tabla 7 <i>Planteamiento de conceptos</i>	30
Tabla 8 <i>Parámetros requeridos en la estructura del robot manipulador</i>	31
Tabla 9 <i>Análisis estático de los elementos del robot</i>	37
Tabla 10 <i>Opciones de material para la estructura del robot manipulador</i>	39
Tabla 11 <i>Ponderación en la selección del material</i>	39
Tabla 12 <i>Ponderación de costos para las Opciones del material</i>	40
Tabla 13 <i>Ponderación de peso para las Opciones del material</i>	40
Tabla 14 <i>Ponderación de capacidad de mecanizar del material</i>	40
Tabla 15 <i>Ponderación de implementación del material</i>	40
Tabla 16 <i>Conclusión en la selección de diseño para el material</i>	41
Tabla 17 <i>Propiedades del plástico PLA</i>	41
Tabla 18 <i>Propiedades del Aluminio</i>	42
Tabla 19 <i>Elementos que conforman el efector final</i>	56
Tabla 20 <i>Opciones de material para el manipulador</i>	58
Tabla 21 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el material</i>	58
Tabla 22 <i>Ponderación de costos del material del manipulador</i>	59
Tabla 23 <i>Ponderación de peso del material del manipulador</i>	59
Tabla 24 <i>Ponderación de capacidad de mecanizar del material del manipulador</i>	59
Tabla 25 <i>Ponderación de implementación del material del manipulador</i>	59
Tabla 26 <i>Conclusión en la selección de diseño para el material del manipulador</i>	60
Tabla 27 <i>Parámetros del robot antropomórfico</i>	65
Tabla 28 <i>Efectos cinéticos sobre la fuerza de agarre requerida por pinza</i>	69

Tabla 29 <i>Características en Marcas de Servomotores</i>	81
Tabla 30 <i>Características Técnicas de los motores requeridos y elegidos</i>	82
Tabla 31 <i>Los requerimientos para el microcontrolador</i>	82
Tabla 32 <i>Características técnicas de plataformas de desarrollo comerciales</i>	83
Tabla 33 <i>Medios de transmisión de datos</i>	84
Tabla 34 <i>Medios de comunicación entre la Pc y tarjeta de control</i>	84
Tabla 35 <i>Características de Dispositivo Kinect</i>	90
Tabla 36 <i>Argumentos fijos del robot manipulador</i>	92
Tabla 37 <i>Resumen de fórmulas de ángulos de cada articulación del robot</i>	99
Tabla 38 <i>Selección de editor de interfaz gráfica</i>	103
Tabla 39 <i>Arquitectura y funcionamiento del HMI</i>	104
Tabla 40 <i>Limitaciones del dispositivo Kinect</i>	114
Tabla 41 <i>Pruebas de capacidad de carga del robot manipulador</i>	118
Tabla 42 <i>Tabla de repetitividad</i>	118
Tabla 43 <i>Tabla de errores en la repetitividad punto 1</i>	119
Tabla 44 <i>Tabla de errores en la repetitividad punto 2</i>	119
Tabla 45 <i>Pruebas de visión artificial utilizando objeto amarillo</i>	120
Tabla 46 <i>Errores en pruebas de visión artificial utilizando objeto amarillo</i>	120
Tabla 47 <i>Pruebas de visión artificial utilizando objeto verde</i>	120
Tabla 48 <i>Errores en pruebas de visión artificial utilizando objeto verde</i>	121
Tabla 49 <i>Recolección de objeto amarillo</i>	121
Tabla 50 <i>Errores en pruebas de posicionamiento utilizando objeto amarillo</i>	122
Tabla 51 <i>Recolección de objeto verde</i>	122
Tabla 52 <i>Errores en pruebas de posicionamiento utilizando objeto verde</i>	122

RESUMEN

El presente trabajo corresponde al desarrollo de un sistema de recolección de muestras para la plataforma robótica de exteriores perteneciente al laboratorio de manufactura. El objetivo principal del proyecto es la implementación de un manipulador capaz resolver un proceso automático utilizando visión artificial proporcionada por el dispositivo Kinect, el cual nos proporciona parámetros necesarios, como la profundidad, requerida para localización de los objetos, todo esto mediante el uso de software libre. A través de la construcción de un brazo antropomorfo de 6 grados de libertad que se diseñó para la futura integración al proyecto realizado por Obando y Garzón el cual es una plataforma móvil, se obtuvo un sistema embebido para la recolección de objetos. Adicionalmente se implementó una interfaz gráfica que permite al usuario visualizar los objetos reconocidos y brindarle la posibilidad de controlar la operación de recolección de objetos en un entorno controlado, los objetos a tomar deben estar localizados dentro de un área de trabajo predeterminada.

PALABRAS CLAVES:

- **MANIPULACIÓN DE OBJETOS**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **DINÁMICA ROBOT ANTROPOMÓRFICO**
- **DESACOPLAMIENTO CINEMÁTICO**

ABSTRACT

The main objective of this project is the implementation of a manipulator, which is able of solving an automatic process using artificial vision, it is provided by the Kinect device, which provides necessary parameters, such as the depth, required for objects location, all this using free software. Through the construction of an anthropomorphic arm with six degrees of liberty, which was designed for future integration into the project executed by Obando & Garzón, whose job is a mobile platform, and its result is an embeded system to the recollection of objects. In addition, a graphical interface was implemented, it allows users to visualize the recognized objects and provide them the possibility of controlling the operation and collect objects into a controlled environment; therefore, the objects to be taken must be located within a predetermined work area.

KEYWORDS:

- **MANIPULATION OF OBJECTS**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **DYNAMIC ANTHROPOMORPHIC ROBOT**
- **KINEMATIC DECOUPLING**

Capítulo 1

1.1. Introducción

En el capítulo se redacta el motivo para el desarrollo de un sistema de recolección de muestras integrado a la plataforma robótica de exteriores. Se analiza el problema dando importancia a la respectiva resolución. Para ello, se planifica el estudio de las condiciones de la plataforma existente, y proceder a acondicionarla de acuerdo a ello las dimensiones del robot manipulador, se definen los objetivos a cumplir y se determina el alcance del proyecto.

1.2. Antecedentes

Los robots recolectores son utilizados en la industria ya sea para el manejo de desechos peligrosos, incluso se los utiliza en la agricultura para la recolección de productos para el consumo diario. (Sanz, 2011). En el ámbito de robots móviles con capacidad de recolección tenemos varios trabajos realizados a nivel mundial.

A nivel internacional en Bangkok (Phunopas, 2016) en la Universidad de King Mongku se desarrolló el proyecto denominado “iRAP Robot”, sus autores son: Amornphun Phunopas y Yatip Uaramorn., este equipo cuenta con un sistema de itinerancia alrededor del terreno áspero usando ruedas tipo oruga, además su diseño cámaras fijas montadas en el brazo y en el cuerpo del robot para ayudar a identificar las posibles víctimas. El robot utiliza motores de alta calidad y mapeo tridimensional logrados con el sensor Kinect. El sistema puede medir la temperatura, el CO_2 , la distancia, para crear un mapa y una comunicación bidireccional. El objetivo preliminar de este sistema fue lograr un rescate práctico para una verdadera situación tal como desastre, terremoto y edificio destruido.



Figura 1 iRAP Robot
Fuente: (Phunopas, 2016)

En 2012 Rover Curiosity aterriza en Marte. Es un robot de 899 kilogramos con 75 kg de instrumentos científicos. La altura máxima es de 2,2 metros, mientras que la longitud de su brazo robótico es de 2,1 metros. Posee seis ruedas con un diámetro de 50 centímetros, cada una de ellas con un motor eléctrico independiente. Tanto las ruedas frontales como las traseras se pueden dirigir independientemente, lo que permite rotar el vehículo alrededor de su eje. La suspensión garantiza que las seis ruedas estén en contacto con el suelo en todo momento, independientemente de la rugosidad del terreno. Una de sus funciones es tomar muestras del suelo marciano y analizar su composición. (Technology, 2012)



Figura 2 Rover Curiosity.
Fuente: (Technology, 2012)

A continuación, se cita puntualmente trabajos previos realizados en la Universidad:

- Diseño e implementación de un robot móvil autónomo y tele operado para labores agrícolas (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013)

El robot es un prototipo autónomo y tele operado capaz de realizar la fumigación en plantaciones de rosas. Plataforma móvil con arreglo diferencial de 3 ruedas que posee un sistema hidráulico de distribución y aspersión de fungicida.



Figura 3: Robot móvil MITNATOR.

Fuente: (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013)

- Repotenciación del Robot desactivador de bombas con control teledirigido del grupo e intervención y rescate G.I.R perteneciente a la Policía Nacional del Ecuador. (Cóndor Zapata & Martinez Herrera, 2017)

El robot es de tipo híbrido, combinando un robot móvil y un brazo de tipo antropomórfico con una pinza como efector final, tiene la capacidad de moverse en suelos no articulados y gradas mediante las ruedas tipo orugas.



Figura 4 Robot desactivador de bombas
Fuente: (Cóndor Zapata & Martínez
Herrera, 2017)

Por último, el proyecto de titulación en el cual se basa el presente trabajo:

Desarrollo de un sistema de ubicación en la plataforma robótica para exteriores teleoperada del laboratorio de manufactura (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado , 2016)

El proyecto cuenta con un sistema de ubicación para la plataforma robótica de exteriores teleoperada de dimensiones $810 \times 660 \times 410$ mm, con un peso de 30 kg y una carga útil de 20 kg. Se basa principalmente en el uso de un LIDAR y un GPS, Figura 5 El sistema permite al usuario tener un pleno conocimiento del lugar exacto en el que se encuentra la plataforma y así poder operarlo adecuadamente. Adicionalmente, la plataforma es operada mediante un mando remoto capaz de recibir los datos de los sensores y la imagen en tiempo real de la cámara a bordo. También, a partir de los datos obtenidos crea un mapa 2D de la zona. Finalmente, el control del robot móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS).

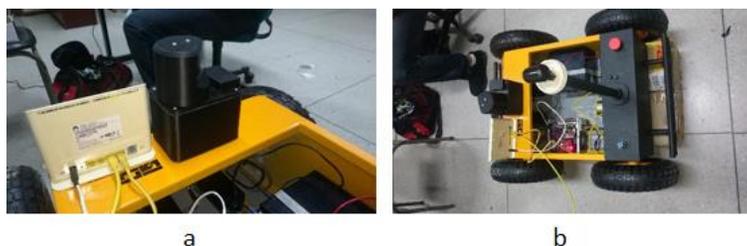


Figura 5 (a) Router y (b) cámara web en la plataforma.
Fuente: (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado , 2016)

Cuenta con un sensor construido apto para mapeo y uso en exteriores con un ángulo de operación de 360°; posee una resolución de 1,8°, y detecta obstáculos a una distancia máxima de 24 metros. La fabricación del mismo se realizó en su totalidad en plástico ABS mediante impresión 3D.

Tiene autonomía para su movimiento, se basa principalmente en el uso de un LIDAR y un GPS. Es operada mediante un mando remoto capaz de recibir los datos de los sensores y la imagen en tiempo real de la cámara a bordo, a partir de los datos obtenidos crea un mapa 2D de la zona. Figura 6

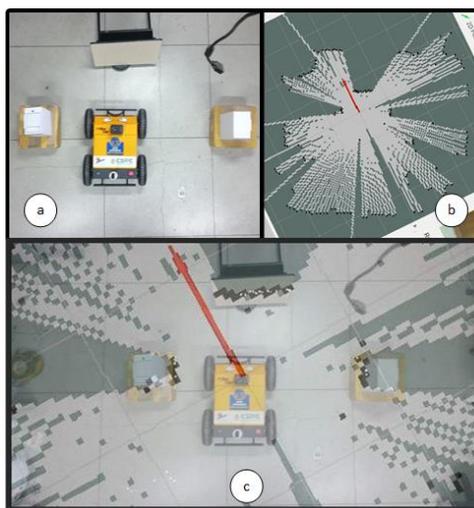


Figura 6 Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado (a) vista superior, (b) vista del mapa generado y (c) fusión para comparación del mapa.

Fuente:(Garzón Jaramillo & Obando Maldonado , 2016)

El control de la plataforma lo realiza en su totalidad un sistema embebido (Raspberry Pi 2 Model B). Todos los controladores electrónicos se ubican en una caja metálica. Los componentes utilizados son: 2 Shield Monster Driver – Puente H de potencia con capacidad de controlar dos motores mediante modulación de PWM, un DSN 5000 regulador de voltaje hasta 24 V, una placa PBC realizada para el acondicionamiento del sensor LIDAR, un ventilador, un router, una cámara web y una batería 12 V.

El control de la plataforma robótica móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS) involucra el desarrollo de siete nodos principales. Los nodos de LIDAR, GPS y cámara web envían los datos desde el robot. El nodo de control de motores comanda los actuadores que sirven para el desplazamiento. Los nodos de operación remota, SLAM se encargan de la teleoperación y sistema de ubicación. Además, un nodo extra permite usar al GPS como señal de odometría en exteriores. Dos nodos adicionales se encargan del reconocimiento y seguimiento de códigos QR.

Actualmente, la plataforma es funcional y se encuentra en el laboratorio de manufactura, necesita ciertas adaptaciones para tener una aplicación objetiva que le permita desempeñarse en ambientes peligrosos.

1.3. Planteamiento del Problema

La robótica tiene varias aplicaciones entre ellas es la manipulación de objetos. La principal función que se espera de un robot móvil es su capacidad de interactuar con el medio, problema que ya se ha resuelto en casos puntuales y ambientes controlados como son líneas de producción en general (Aguilar, Casaliglla, & Pólit, Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles, 2017), (Aguilar, Salcedo, Sandoval, & Cobeña, 2017), (Aguilar, Casaliglla, & Pólit, Obstacle Avoidance for Low-Cost UAVs, 2017), (Aguilar, Angulo, & Costa-Castello, Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking, 2017), (Aguilar, Casaliglla, Pólit, Abad, & Ruiz, Obstacle Avoidance for Flight Safety on Unmanned Aerial Vehicles, 2017). Sin embargo, si disminuimos las restricciones y le damos una mayor libertad de decisión a un robot aparecen deficiencias en muchas áreas que impide que la robótica sea comercialmente viable para ambientes menos controlados. Con mucha razón un gran paso para la robótica móvil es contar con robots estructural y funcionalmente robustos que pueden operar en tiempo real y respondan a diferentes exigencias a los que se los someta.

La presencia de robots autónomos robustos en ambientes no controlados tiene muchas aplicaciones, desde asistentes, traslado de objetos en industrias y oficinas, robots de cuidado de salud para enfermos o ancianos hasta en el ámbito militar principalmente en la desactivación de bombas. Lo cual significa una reducción de costos en el cuidado y una mejor calidad de vida para el mencionado grupo de personas.

Se han realizado varios avances tecnológicos respecto los mencionados tipos de aplicaciones durante los últimos años, lo que no se ve reflejado en el Ecuador pues, los avances no son realmente significativos.

Es de vital importancia incorporar en la sociedad un sistema que permita al usuario recolectar muestras de ambientes peligrosos, así como el control y visualización del área en el que se encuentra operando el usuario.

1.4. Justificación e importancia

El desarrollo de proyecto permitirá realizar exploración y búsqueda en entornos peligrosos que pone n en riesgo la integridad física de los seres humanos, además clarificar el área con poca iluminación y condiciones ambientales adversas. Es así que, mediante el ingenio se otorga la posibilidad de manipular objetos en ambientes controlados.

La importancia radica en que el uso del robot es adecuado para realizar manipulación de objetos que atenten contra la salud de las personas, de esta manera se cuida la integridad de la misma al acceder en diferentes ambientes con poca iluminación y condiciones extremas de temperatura y humedad.

El alcance del proyecto dejara abierta la posibilidad de continuar con la investigación en el campo de robots manipuladores móviles, además del mejoramiento continuo en aplicaciones como la implementación de un sistema de olfateo artificial de sustancias peligrosas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de recolección de muestras para la plataforma robótica de exteriores perteneciente al Laboratorio de Manufactura del DECEM.

1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un robot antropomórfico con 6 grados de libertad para la recolección de muestras.
- Relacionar los sistemas de monitoreo y control en un solo dispositivo por medio de un sistema embebido
- Establecer un sistema de mapeo tridimensional simultáneo por medio de un algoritmo que permita explorar un lugar en busca de objetos para su recolección.
- Analizar el correcto funcionamiento del prototipo

1.6. Alcance

El proyecto se basa en la ampliación de la plataforma robótica para exteriores teleoperada (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado , 2016) ya existente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Luego de realizar un exhaustivo análisis sobre la misma se puede añadir lo siguiente:

Se diseñará y construirá un robot antropomórfico con 6 grados de libertad ver Figura 6 que permitirá al robot móvil alcanzar un área de trabajo adecuada para su posterior aplicación que es la recolección de objetos.

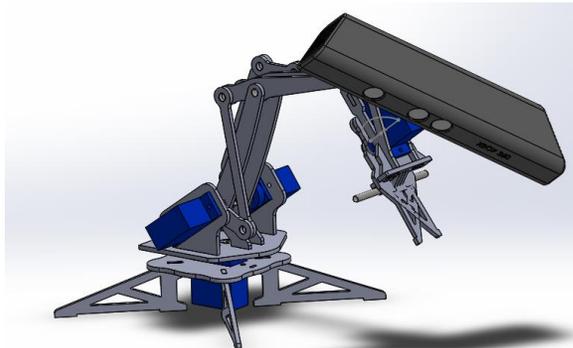


Figura 6 Robot antropomórfico

Se usará un solo sistema embebido para la transmisión, recepción y control de señales por el sistema para su visualización en el dispositivo de interfaz.

El sistema podrá recolectar objetos y colocarlos en una posición distinta.

1.7. Estructura del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos donde se describirá toda la información relacionada para desarrollar un sistema de recolección de muestras integrado a la plataforma robótica de exteriores.

El capítulo 2 (Estado del Arte), primero presenta el detalle de los conceptos necesarios acerca de robots industriales, donde se presenta una breve reseña de la robótica móvil con manipulación de objetos, el proceso de reconocimiento de objetos. También se describe la percepción y los sensores capaces de medir las condiciones ambientales en donde se desarrolla las actividades programadas.

El análisis de la plataforma existente es realizado en el Capítulo 3 (diseño), se describen las dimensiones necesarias para el acoplamiento efectivo. También, se detalla el diseño mecánico para la adaptación de la base del robot a la plataforma. Luego se describe el diseño electrónico donde se observa los componentes

electrónicos utilizados y los diagramas. Por último, se presenta el diseño del sistema de control donde se encuentra la parte del controlador y su programación.

La construcción o adquisición de los elementos necesarios luego de la etapa de diseño es descrita en el capítulo 4 (Construcción y Pruebas). Se detalla el paso a paso del montaje de todos los elementos. Finalmente se observa los resultados de las pruebas realizadas.

Los principales resultados del proyecto de titulación y las conclusiones que genera su realización se sintetizan en el Capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones). Recomendaciones para el trabajo futuro son también incluidas.

Capítulo 2

2.1. Marco Teórico

El capítulo compendia las definiciones generales sobre robots industriales y centra su estudio en los robots antropomórficos y robots híbridos. Se realiza el estudio del desarrollo de los manipuladores y aplicaciones. Analiza la percepción del entorno mediante sensores y las técnicas para la extracción de características del mismo (Aguilar & Angulo, Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles, 2016), (Aguilar & Angulo, Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles, 2014), (Aguilar & Angulo, Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles, 2014), (Aguilar, Angulo, & Pardo, Motion intention optimization for multirotor robust video stabilization, 2017), (Galarza, Pérez, Serrano, Tapia, & Aguilar, 2018). Describe los métodos de percepción mediante visión 3D. Se analiza la funcionalidad del sensor Kinect.

2.2. Robots Industriales

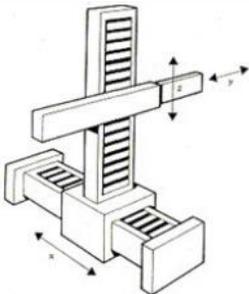
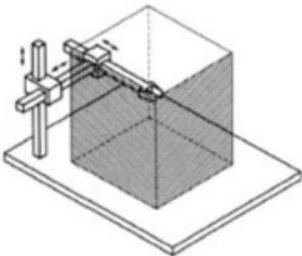
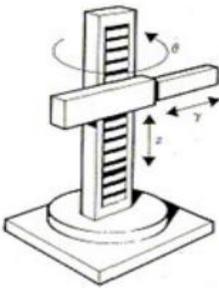
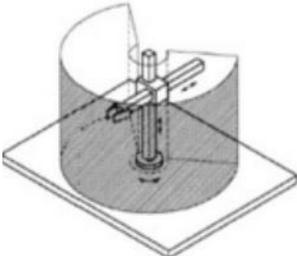
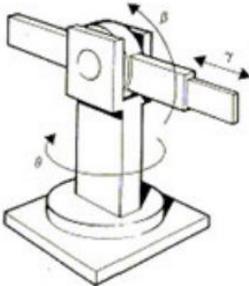
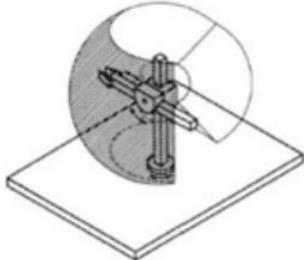
Un robot industrial es una máquina manipuladora con varios grados de libertad controlada automáticamente, reprogramable y de múltiples usos, puede estar en un lugar fijo o móvil para su empleo en aplicaciones industriales. (Kelly & Santibañez, 2008)

Estos tipos de robots son muy utilizados en la industria, ya que por su versatilidad permite que se adapten a varias funciones, a pesar de esto, se deben utilizarlos en su aplicación nominal caso contrario no se garantiza un rendimiento óptimo.

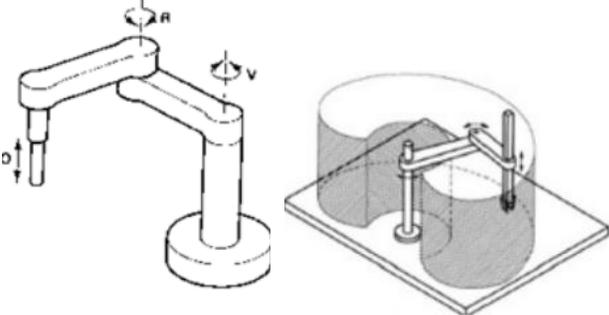
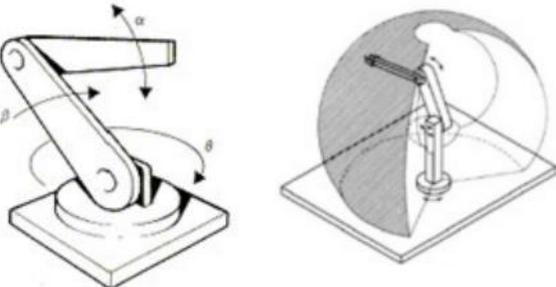
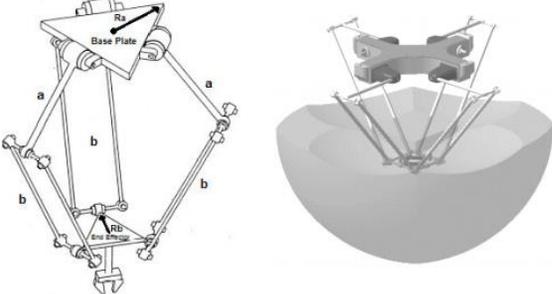
2.3. Tipos de Robots Industriales

Las combinaciones de articulaciones, eslabones y tipos de movimientos determinan la morfología en un robot y el volumen de revolución (espacio de trabajo en el que ellos pueden operar), dando lugar a distintos tipos de configuraciones de robots industriales como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Clasificación de los Robots Industriales

Nombre	Característica	Figura	Volumen de revolución
Robot Cartesiano	Formado por tres articulaciones de tipo prismático PPP. Tiene tres GDL. - Se mueve en x, y, z.		
Robot Cilíndrico	- Tiene tres GDL, dos movimientos lineales y un rotacional (RPP). - La articulación de la base es del tipo rotacional.		
Robot Esférico o Polar	- Tiene tres GDL, dos movimientos rotacionales perpendiculares entre sí y un movimiento lineal (RRP).		

CONTINÚA

Robot Scara	Se parece al esférico, pero los tres ejes son paralelos entre si (RRP).	
Robot Antropomórfico	Es una variación del esférico con tres articulaciones, una rotacional y dos angulares.	
Robot Delta	Robot de brazos Paralelos conectados a juntas universales en su base (RRR)	

Fuente: (Chw, 2013)

2.4. Robot antropomórfico

Robot Antropomórfico es una de las configuraciones que tienen los robots industriales, se asemejan al ser humano principalmente en la parte del hombro, brazo y muñeca, que le sirven básicamente para ponerse en una posición en el espacio y orientarse para realizar un determinado trabajo. La mencionada configuración de robots industriales ayuda mucho en tareas peligrosas, pesadas y repetitivas, reduciendo la cantidad de movimientos posibles que posee, por esta razón el sector industrial está implementándolas en sus plantas de producción.

El robot antropomórfico de manera ecuménica cuenta con tres acoplamientos para posicionar y tres para orientar la pieza o herramienta del robot, presenta cinco o seis grados de libertad como se observa en la Figura 7. La estructura que presenta el robot tiene gran maniobrabilidad, puede variar la posición y orientación mejorando el acceso del efector final a espacios reducidos poco accesibles.



Figura 7 Configuración de un robot antropomórfico.
Fuentes: (Kelly & Santibañez, 2008)

2.5. Robot Híbrido

Son robots difícilmente se los ubica en una sola configuración, móviles o robots industriales ya que combinan dos o más de las estructuras, se consideran híbridos robots formados por la intersección de un carro y de un brazo semejante al de los robots industriales. La combinación de dos sistemas de locomoción en un único sistema híbrido permite obtener la velocidad, controlabilidad y autonomía propios de una plataforma móvil terrestre. Cuando se habla de robot híbrido se refiere a la fusión de configuraciones más no al término híbrido de combinación en la energía locomotora. (Chavaliers, 2015)

En la actualidad el uso de robots híbridos es cada día más común, fusionan la versatilidad del desplazamiento y las capacidades de trabajar con los materiales o en los materiales, como es el caso de robots

para trabajos con explosivos, robots para incendios, sub acuáticos para recolección en el fondo marino, obsérvese la Figura 8.



Figura 8 Aplicación de robots híbridos. a) Robo Sally desactivador de b) Robot extintor Scarab Vulcain.

Fuente: (Chavaliers, 2015)

2.6. El proceso de manipulación

Para la manipulación de objetos se tienen en cuenta varios parámetros tal como lo menciona (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005) . Los tiempos de manipulación deben ser cortos para evitar contratiempos en el funcionamiento, pues estos son dependientes de los objetos y el entorno de aplicación, hay 3 etapas en el proceso de manipulación. Aunque en realidad todos estos se ven afectados en las condiciones ambientales en las que se ejecute el proceso.

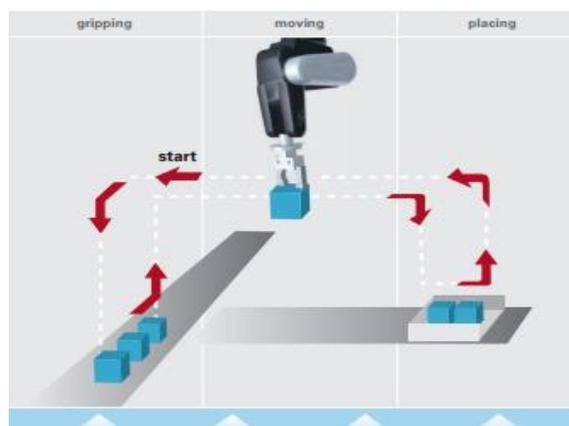


Figura 9 Fases de un proceso de manejo y sus condiciones ambientales

Fuente: (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005)

2.6.1. Desarrollo de manipuladores

Los manipuladores se han desarrollado desde el inicio de la era industrial como lo menciona (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005), en donde ya se mantenía una buena relación fuerza- peso, además que se buscaba mejorar la vida útil, empleando materiales cada vez más resistentes ver Figura 10

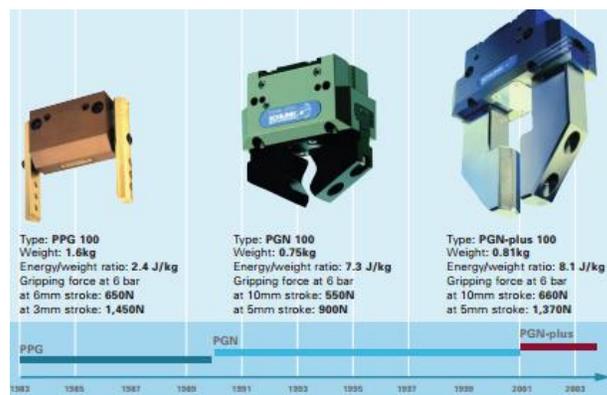


Figura 10 Desarrollo de grippers Fuente: (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005)

A medida que se avanzaba en desarrollo de robots se fueron acoplando grippers para cada tipo o función del robot. Los grippers actuales son diseñados modularmente es decir con piezas intercambiables, que se pueden adaptar al material del objeto que se desea manipular.

Un claro desarrollo es el realizado por SRI's Mechatronics laboratory en la U.K. este Gripper permite tomar objetos tan delicados como la ciruela Figura 11. El Gripper cuenta con un mecanismo que tiene una tira de cinta movable se envuelve alrededor de cada dedo de la pinza.



Figura 11 Pinza desarrollada para la manipulación de elementos delicados

2.7. Percepción de Entornos

Uno de los objetivos principales de un sistema híbrido capaz de manipular objetos en su entorno, es tener el suficiente conocimiento de lo que se encuentra a su alrededor, siendo el caso es necesario que se encuentre en las condiciones de medir la mayor cantidad de datos de su entorno, y de acuerdo a la información obtenida realice sus funciones con mayor eficacia.

2.7.1. Percepción mediante visión 3D

Los métodos para la recolección de imágenes en tres dimensiones, esto es, que tengan en cuenta la profundidad, son muy variados, clasificándose en los siguientes tipos:

2.7.1.1. Basados en sensores RGB-D (Kinect)

Para realizar este método se usan dispositivos que permiten capturar imágenes en RGB, además estos últimos deben contar con sensores infrarrojos para obtener los puntos, por el método de triangulación (Aguilar, y otros, On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera, 2017), (Aguilar, y otros, Real-Time 3D Modeling with a RGB-D Camera and On-Board Processing, 2017), (Aguilar, y otros, Visual SLAM with a RGB-D Camera on a Quadrotor UAV Using on-Board Processing, 2017).

La aplicación presentada en (Berger, 2014) utiliza el método RGB-D con la utilización de 3 dispositivos Kinect ver Figura 12 en colocados sobre una plataforma móvil para la parametrización del entorno para reconstruir una sola textura 3D. Los autores afirman que el error en la reconstrucción es de aproximadamente 0.8 píxeles. Para la eliminación del ruido de fondo del objeto con un mapa de bits uniforme agregado en el filtro de las imágenes tomadas por los sensores.

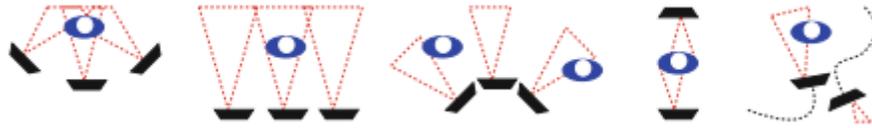


Figura 12 Cinco configuraciones típicas de captura con múltiples Kinect
Fuente: (Berger, 2014)

2.7.1.2. Basado en estéreo cámaras

En este método se requiere la utilización de dos cámaras que colocadas a una distancia estándar que nos permite obtener la disparidad entre cada imagen obtenida por cada una. Al combinar las imágenes obtenidas, visualmente se puede apreciar una apariencia de profundidad y con un algoritmo aplicado con las entradas resultantes obtenemos una distancia aproximada.



Figura 13 Muestra de enfoque de captura con estereoscopia
Fuente: (Liu & Hen, 2005)

Una propuesta realizada por (Liu & Hen, 2005) se hizo un modelo que utiliza principios físicos para reducir el escenario de una imagen, utilizando fuerzas controladas externas.

Usando estas aplicaciones externas con parámetros específicos como es utilizar una superficie lisa, otra contenía una imagen y otra que era un color base, con estos argumentos lo que se intentaba es identificar

agujeros en superficies angulares que son factores de ruido para la reconstrucción 3D. Se utiliza técnicas de estereoscopia para la reconstrucción 3d de una imagen específica.

2.7.1.3. Basado en sensor LIDAR 2D

En el proyecto presentado por (Barón Solans, 2017) se puede evidenciar el uso de este método ya que se usa el sensor Lidar 2D para la reconstrucción de plantas ya arboles propios de una región a través de la recolección de nube de puntos 3D ver Figura 14, lo que se logra montando un conjunto de 3 sensores montados sobre una plataforma móvil para avanzar en la recolección de información, se utiliza un sistema de estabilización dinámica para la corrección de su posicionamiento.



Figura 14 Nube de puntos 3D recolectada por los sensores

2.7.1.4. Basado en sensor LIDAR 3D

Uno de los proyectos robóticos más comentados en la actualidad es el de sus coches autónomos (Ferre, Aracil, & Sanchez Uran, 2008), son utilizados en entornos reales complicados (aunque aún está en pruebas) mediante sensores y sistemas de visión en tres dimensiones. Entre estos sensores hay varios radares, GPS, cámaras 2D, etc. pero el atributo principal de todos ellos es un LIDAR (Basantes, y otros, 2018) con detección de 360° en horizontal y 26.8° en vertical con el que se genera un mapa completo y detallado del entorno como se puede ver en la Figura 15.

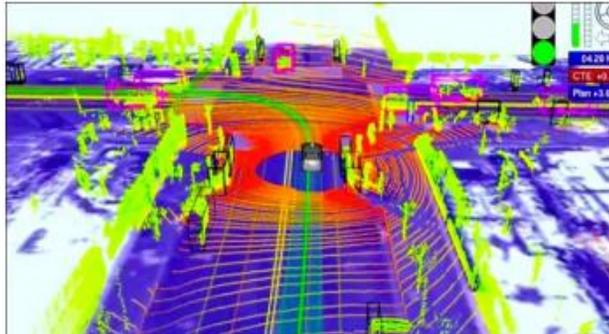


Figura 15 Google Car y mapa 3D generado.

Fuente: (Ferre, Aracil, & Sanchez Uran, 2008)

En cuanto a los organismos de tipo público que más avances realizan en proyectos de robótica y visión artificial, los organismos que más desarrollos realizan son DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Dunbar, 2017).

Por otro lado, la NASA posee un laboratorio de visión 3D para desarrollar sistemas para sus Rover. El desarrollo a destacar es un escáner 3D el cual ha sido colocado en sinergia con un brazo robótico, cuya función principal es la reconstrucción en 3 dimensiones de objetos distintos.

Entre los desarrollos más punteros orientados a la visión artificial 3D están el reconocimiento de objetos Figura 16 mediante el uso de bases de datos que clasifican y almacenan imágenes de los mismos o el reconocimiento y análisis de escenas concretas, ambos desarrollos de uno de los laboratorios de visión artificial del MIT. (Lai, 2010)



Figura 16 Reconocimiento de objetos.

Fuente: (Lai, 2010)

2.8. Sensor Kinect

Kinect, en la Figura 17 desarrollada por Prime Sense y comercializada por Microsoft, fue uno de los primeros dispositivos que proporcionaban visión artificial en tres dimensiones a un coste asequible para los usuarios comunes. Con características suficientemente buenas para muchas aplicaciones profesionales (Izadi, 2011), es uno de los dispositivos que más ha hecho por llevar la visión artificial 3D a todo tipo de dispositivos, robots incluidos.



Figura 17 Kinect de Microsoft.
Fuente: (Microsoft, 2017)

2.8.1. Kinect como sistema de Visión Artificial.

Kinect es un dispositivo que al utilizar al mismo tiempo tecnologías como la visión estereoscópica y la luz estructurada según (Alhwarin, 2013), que son métodos muy robustos en cuanto a la percepción de la profundidad de manera artificial. El proceso de percepción ver Figura 16 se realiza utilizando 2 cámaras RGB, cuyos datos obtenidos son complementados por el sensor infrarrojo de manera que la posición de profundidad sea efectiva de acuerdo al entorno.

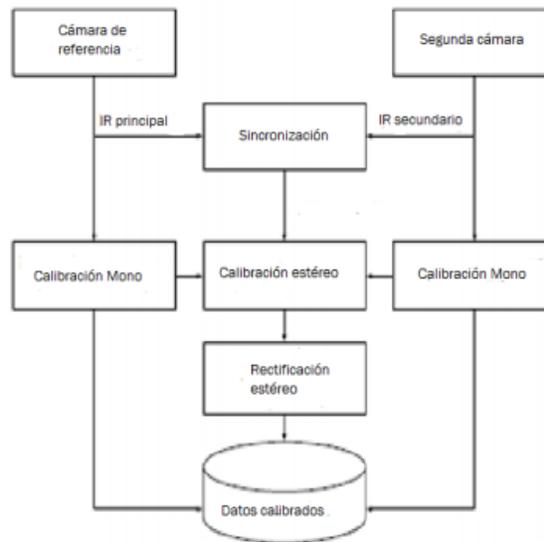


Figura 18 Diagrama de funcionamiento de la calibración de Kinect.
Fuente: (Alhwarin, 2013)

2.8.2. Resolución del sensor IR:

Están en el rango de 1280×1024 píxeles a 15 fps o 640×480 píxeles a 30 fps. Las distintas resoluciones son consecuencia del alto coste computacional requerido para el tratamiento de tantos puntos. La menor resolución es suficiente para la mayoría de las aplicaciones y facilita la detección de un gran número de puntos Figura 19, pero el tratamiento de tal cantidad aun así puede traer ralentizaciones innecesarias, por lo que puede ser interesante reducir aún más esta resolución para según qué casos.

Rango de operación: 0,4m – 3,5 m. Por un lado, el límite inferior hace imposible utilizar el dispositivo demasiado cerca, pero esto no sería una limitante ya que en el caso del robot recolector de muestras la distancia en la cual está ubicado el sensor y el objeto estaría por encima del rango mínimo esto principalmente por las dimensiones actuales de la plataforma.

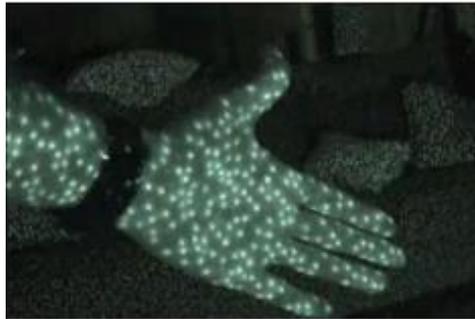


Figura 19 Puntos de luz proyectados por el sensor IR.
Fuente: (Alhwarin, 2013)

El límite superior hace imposible, por ejemplo, el uso de SLAM en un entorno tan amplio como el que se pretende utilizar, no es el caso pues para eso se encuentra el sensor LIDAR ya implementado con anterioridad y únicamente habrá que tener especiales consideraciones en el seguimiento del a un objeto en particular, que no se debe hacer a demasiada distancia.

Las anteriores características son las que hacen que la cámara funcione como lo hace, en especial la nube de puntos que genera. Un ejemplo de cómo el dispositivo enfoca a personas (Aguilar W. G., y otros, Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers and Saliency Maps, 2017), (Aguilar W. G., y otros, 2017), (Aguilar W. G., y otros, Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers with Meanshift, 2017), (Aguilar W. G., y otros, 2017), (Aguilar W. G., y otros, 2017) se puede ver en la Figura 20.

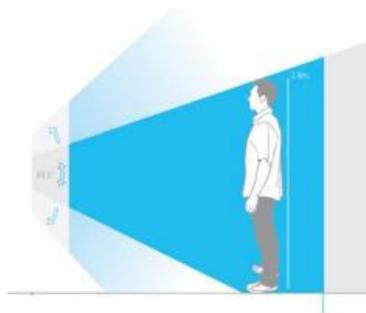


Figura 20 Rangos de visión en Kinect.
Fuente: (Arlington, 2016)

Capítulo 3

3.1. Diseño de robot manipulador de objetos para la plataforma robótica

El capítulo se centra en el diseño del robot manipulador para la plataforma de exteriores. En el inicio de la planificación se realiza la matriz de la calidad la cual permite recopilar información de las necesidades requeridas por el operario del sistema. Tanto las necesidades como especificaciones ayudan en la elaboración de la estructura funcional y la definición de los subsistemas correspondientes. Se plantean Opciones para el diseño de cada uno de los elementos y se realiza la evaluación de ventajas y desventajas de cada uno para seleccionar la mejor alternativa. Posterior a ello, se realizan los cálculos y dimensionamiento de cada uno de los elementos que formarán parte del sistema.

3.2. Matriz de la calidad

En la matriz de la calidad es una metodología que no permite analizar los requerimientos del usuario final de un sistema y se establece los requerimientos funcionales o técnicos, determinando la importancia de cada uno de ellos, de manera que se pueda establecer los subsistemas correspondientes.

3.2.1. Definición de necesidades

Las necesidades son aquellas características requeridas por el usuario, de las cuales se parte para establecer especificaciones funcionales con las que debe cumplir el producto. De esta manera, considera todos los aspectos que permitan realizar un diseño óptimo que cumpla con los requerimientos.

Las necesidades descritas en la Tabla 2 permiten establecer posibles soluciones en la elaboración del proyecto, lo cual se convierte en el punto de partida para el diseño del robot manipulador de objetos, con la finalidad de plantear diversas Opciones factibles y finalmente seleccionar aquella que permita brindar una solución sencilla, económica y eficiente.

Tabla 2

Requerimientos o necesidades del consumidor

No.	Requerimientos
1	El brazo debe ser capaz de manipular objetos
2	Resistente a factores externos
3	De bajo riesgo para su uso
4	El prototipo debe ser controlable y de bajo costo
5	Capacidad baja de carga
6	Debe permitir la interacción con el usuario
7	Facilidad de mantenimiento
8	Alcanzar el mínimo nivel de la plataforma
9	Software de control de uso libre
10	Movimientos que sea capaz de realizar

3.2.2. Definición de características técnicas

Se parte de los requerimientos del usuario final para definir las especificaciones técnicas que les corresponden a todas ellas. En la Tabla 3 se encuentran las especificaciones técnicas obtenidas a partir de las necesidades recopiladas.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del proyecto

No.	Requerimientos
1	Terminal con manipulador de objetos
2	Robusto
3	Seguridad Industrial
4	Costo reducido
5	Material ligero de bastidor y manipulador
6	HMI elaborada de acuerdo con normas
7	Sistema modular
8	Geometría del robot
9	Software libre
10	Grados de libertad

3.2.3. QFD

La finalidad de la aplicación de “Quality Function Deployment”, según (Ficalora & Cohen, 2009) facilita la vinculación de las necesidades del cliente con las características técnicas que permiten cumplirlas. Además de poder determinar la importancia de cada una de ellas con respecto a las demás y se valora individualmente la complejidad del proceso que nos permite cumplirlas

		Columna #									
		Dirección de mejora Minimizar (▼), Maximizar (▲), No aplica (x)									
Requerimientos de Cliente	Weight / Importancia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Requerimientos funcionales	X	▲	▲	▲	X	▲	▲	X	X
		Terminar con manipulador de objetos	Robusto	Seguridad Inicial	Precio económico	Múltiple tipo de babor y manipulador	Inteligencia elaborada de acuerdo con normas	Sistema modular	Geometría del robot	Software de programación de acceso libre	Grados de libertad
El brazo debe ser capaz de manipular objetos	5	○	○	▲	○	○		○	○		
Resistente a factores externos	4		○			○					
De bajo riesgo para su uso	4			○			○			▲	
Debe ser económico y eficiente	3	▲	○		○			○	○	○	
Capacidad baja de carga	4	○	▲		▲	○					
Debe permitir la interacción con el usuario	3			▲			○			○	
Facilidad de mantenimiento	3							○		▲	
Alcanzar el mínimo nivel de la plataforma	4	○	▲		▲			▲	○	▲	
Software de control de uso libre	4				▲					○	
Movimientos que sea capaz de realizar	4				○					○	
Puntuación		219	191	122	200	241	108	161	192	111	152
Rango Relativo		2	5	8	3	1	10	6	4	9	7
Dificultad (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)		4	5	3	3	2	3	4	4	3	4

Figura 22 Matriz del sistema de recolección de muestras propuesto

Para analizar las relaciones en los parámetros obtenidos se utiliza la simbología japonesa que indica en la

Tabla 4

Tabla 4

Escala japonesa de correlación entre requerimientos

Muy Correlacionado	◎	9
Correlacionado	○	3
Poco Correlacionado	△	1
Ninguna		

Fuente: (Ficalora & Cohen, 2009)

En la Figura 22 se muestra la Matriz, se parte de obtener las necesidades del consumidor para poder dar un rango de importancia que nos permite priorizar las características del sistema a desarrollar. Una vez identificadas las necesidades y puestas en orden de acuerdo a la relevancia expuesta en la matriz QFD se

procede a implantarlas en lenguaje técnico que nos permite cuantificar o cualificar de manera más precisa las características del sistema a desarrollar Tabla 5.

Tabla 5
Resultados de la matriz QFD

Hito	Características Técnicas	Puntuación
1	Material de bastidor y manipulador	241
2	Terminal con manipulador de objetos	219
3	Costo reducido	200
4	Geometría del Robot	192
5	Robusto	191
6	Sistema modular	161
7	Grados de libertad	152
8	Seguridad Industrial	122
9	Software de programación de acceso libre	111
10	Interfaz diseñada de acuerdo a guía Gedis	108

3.3. Factibilidad y planeación

3.3.1. Estructura funcional

Una vez obtenidos los resultados de la metodología de la casa de la calidad, se genera subsistemas capaces de cumplir con una o más características técnicas definidas, se lo hace con la finalidad de simplificar el desarrollo del sistema

La separación por subsistemas ayuda con el desglose de las capacidades y características con las que nuestro sistema de debe cumplir de acuerdo las necesidades del usuario. Para desarrollar el robot antropomórfico para la plataforma robótica de exteriores, se establecen los subsistemas especificados en Tabla

Tabla 6
Subsistemas definidos para el diseño

No.	Subsistema	Funciones	Hitos que cumplir
1	Estructura del Robot Manipulador	Orientación y posicionamiento del manipulador de objetos	1,2,3,4,5,6,7
2	Potencia	Sistema de alimentación y actuadores	1,2,3,6
3	Control	Control del sistema, envío de comandos y datos.	3,8,9
4	Algoritmo de Posicionamiento del robot	Posicionamiento referencial del robot	7
5	Algoritmo de visión artificial	Reconocimiento de formas y posición de objetos.	4,8
6	Interfaz humano-máquina	Interacción con el usuario	8,10

El proceso de diseño de un producto según (Rod, 2014), presenta dos etapas:

- Diseño Preliminar: Fase en la cual se expone, valora y elige las mejores opciones de diseño.
- Diseño Final: Fase en la cual se exponen los diseños de los conceptos seleccionados.

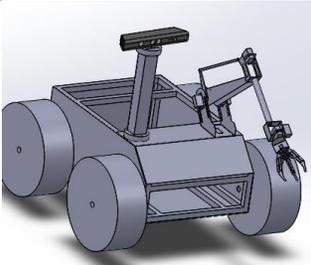
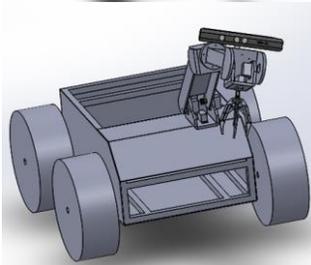
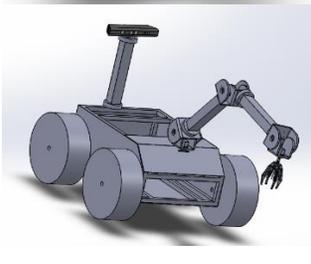
A continuación, para el desarrollo del prototipo, se consideran el diseño mecánico, electrónico, control y de software.

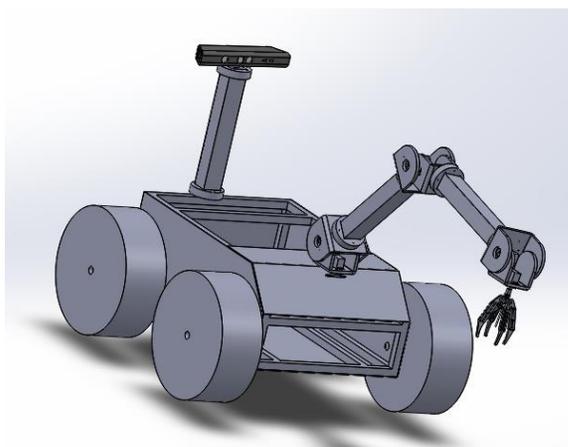
El diseño mecánico se analizan los principios elementales hasta llegar a análisis avanzados como elementos finitos, de esta manera conseguir resultados que nos permitan tener la seguridad de que la estructura soportara las cargas previstas en el diseño.

En el diseño electrónico y de control se procede con los cálculos de básicos de circuitos eléctricos para una operación correcta del sistema pasando por un diseño de lazo abierto.

En la fase preliminar al diseño se contempló varios conceptos de los cuales seleccionaron los siguientes.

Tabla 7*Planteamiento de conceptos*

No	Concepto	Características
1		<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de recolección de objetos con visión independiente. • Estructura ligera • Reducido número de piezas • Capacidad de carga baja
2		<ul style="list-style-type: none"> • Visión acoplada a la estructura • Sistema de transmisión por engranajes • Estructura medianamente ligera. • Capacidad de carga alta
3		<ul style="list-style-type: none"> • Visión independiente de la estructura del robot. • Estructura medianamente ligera • Piezas de arquitectura modular • Capacidad de carga baja • Reducido número de piezas

**Figura 23** Concepto posicionamiento de sistema de recolección de muestras

3.4. Subsistema 1. Estructura del Robot Manipulador

Para la estructura se considera los aspectos más importantes para su posterior diseño y desarrollo, como ver Tabla 8:

Tabla 8

Parámetros requeridos en la estructura del robot manipulador

Parámetro	Característica
Configuración del brazo	Se la selecciona la configuración antropomórfica porque permite obtener mejor orientación y movimientos complejos con mayor facilidad. Sus articulaciones poseen movimientos rotacionales y varios angulares.
Capacidad de carga	La capacidad de carga esperada es de 500 gramos como máximo, la cual será levantada y transportada de una posición a otra.
Grados de Libertad	Es necesario 6 grados de libertad, puesto que 3 se utilizará para la definir la posición y los 3 restantes para la orientación del robot manipulador.
Velocidad	La velocidad que alcance del efector final puesto que no se requiere velocidades altas se aproximaría 0.8 m/s, en la manipulación y traslado de objetos generalmente es necesario tener bajas velocidades. Además del tiempo de abertura del manipulador se establecerá en 12s.
Alcance máximo	-Se considera la distancia que se requeriría para alcanzar un objeto a la base de la plataforma, por lo cual se establece una distancia máxima de 75 cm.

3.4.1. Modelado de la estructura

Para construir la estructura del brazo robótico se emplea piezas diseñadas de tal manera que nos permitan tener una arquitectura tipo modular, las que nos permiten obtener las articulaciones necesarias para el movimiento del robot en sus 6 grados de libertad.

Se inicia con el diseño con la base de la estructura que soportará el peso de la estructura del robot ver Figura 24, la cual debe ser capaz de mantener la posición en cualquier disposición en la que se encuentren los

eslabones del robot. Por lo cual se debe analizar el tipo de soporte y alineamiento que tendrá con el resto de la estructura.

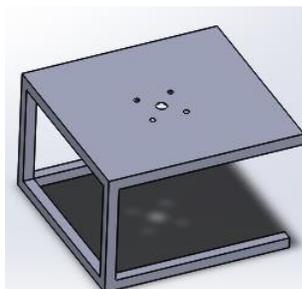


Figura 24 Base del Robot Manipulador

Se calcula con la carga total del robot que es de aproximadamente 6kg como viga en voladizo, en el plano y-z Figura 25 y Figura 26 se obtiene las reacciones:

$$A_y = 588N \quad M_a = 102.9 Nm$$

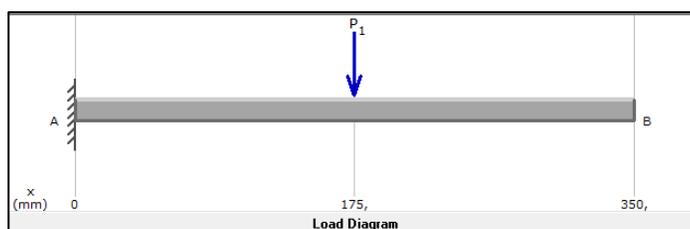


Figura 25 Diagrama de cargas en la estructura base

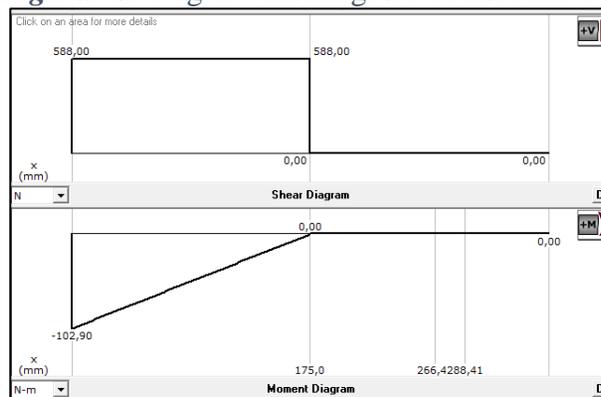


Figura 26 Reacciones y momentos en el plano y-z

De la misma forma se obtiene las correspondientes reacciones y momentos en el plano $x - z$

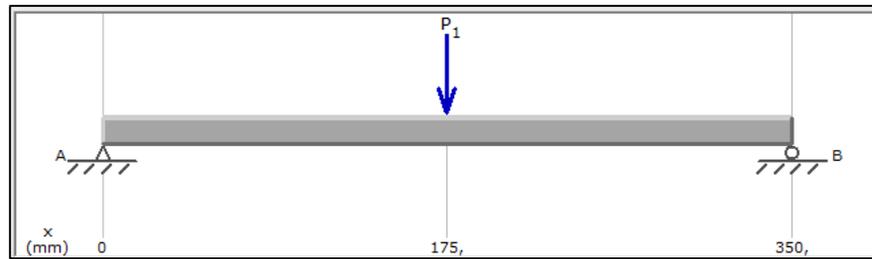


Figura 27 Diagrama de cargas en la estructura base plano $x-z$

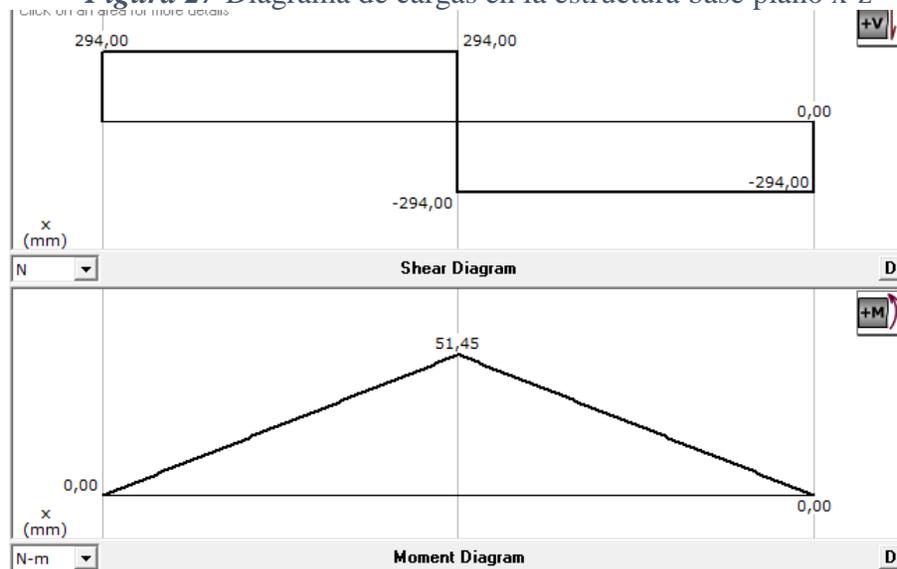


Figura 28 Reacciones y momentos en el plano $y-z$

$$A_x = 294 \text{ N} \quad M = 102.9 \text{ Nm}$$

$$A_x = 294 \text{ N}$$

$$B_x = 294 \text{ N}$$

$$M_{Ax} = 51.45 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, se obtiene el Momento máximo para el análisis posterior.

$$M_{m\acute{a}x} = 102.9 \text{ Nm}$$

De acuerdo los cálculos se sugiere elegir un perfil cuadrado de acero ASTM A36

$$\sigma = \frac{M_y}{i} = \frac{M}{\frac{I}{C}} = \frac{M}{S}$$

$C =$ distancia desde la línea neutra a la base mas lejana

$S =$ módulo de la sección

$$\sigma_{f1 \text{ A36}} = 250 \text{ Mpa} = 200 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{\sigma_{f1}}{n}$$

$$\frac{M}{S} = \frac{\sigma_{f1}}{n}$$

$$M_{max} = 102900 \text{ Nmm}$$

$$\frac{250 \text{ N/m}^2}{3} = \frac{102900 \text{ N mm}}{S}$$

$$S = 1.23 \text{ cm}^3$$

Finalmente se selecciona la tubería estructural cuadrada de 20 mm de sección y 2 mm de espesor, que presenta las características que se indican en la Figura 29 .

Tubería Estructural Cuadrada

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
B	e			Eje x-x = y-y		
		A	P	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,40	0,99	0,78	0,56	0,56	0,75
	1,50	1,05	0,83	0,58	0,58	0,75
	1,80	1,23	0,96	0,66	0,66	0,73
	2,00	1,34	1,05	0,70	0,70	0,72
25	1,40	1,27	1,00	1,16	0,93	0,95
	1,50	1,35	1,06	1,22	0,97	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	1,11	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	1,19	0,93

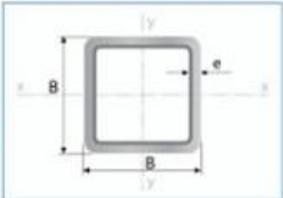


Figura 29 Características del perfil seleccionado para la base del robot
Fuente: (IPAC Duferco Group, 2014)

A partir de los datos de la viga seleccionada se calcula el factor de seguridad

Se tiene que
$$S = 0.70\text{cm}^3 \times \frac{10^3\text{mm}^3}{1\text{cm}^3} = 700\text{mm}^3$$

$$\frac{250 \frac{N}{\text{mm}^2}}{n} = \frac{102900\text{Nmm}}{700\text{mm}^3}$$

$$n = 1.7$$

Análisis estático de diseños

Para los elementos indicados en la Tabla 9 se realizó el análisis estático, de manera que se pueda conocer la reacción de cada pieza según la fuerza aplicada.

En la primera articulación se diseña un módulo cuyo movimiento proporciona rotación al brazo, lo cual requiere de un acople necesario para unirse al siguiente motor como se ve en la Figura 30. El diseño de la pieza tiene los agujeros para pernos necesarios para la sujeción mecánica. Adicionalmente se hicieron más agujeros que en el caso de posibles aislamientos se pueden utilizarlos sin la necesidad de cambiar un elemento o pieza.

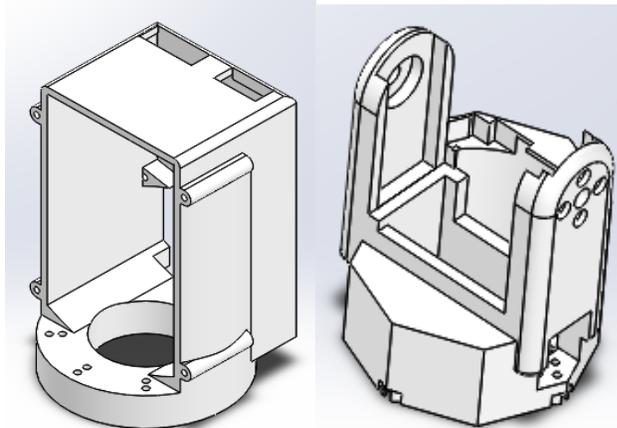


Figura 30 Acoples para la articulación de la base y codo

A continuación, se diseña un eslabón, ya que debido al alcance que tendrá el robot manipulador, se requiere de dimensiones mayores a las que nos proporcionan los acoples.

Para reducción de peso de la estructura lo eslabones largos se usan módulos comerciales ligeros y de bajo costo ver Figura 31, la selección de material que se realizará más adelante.

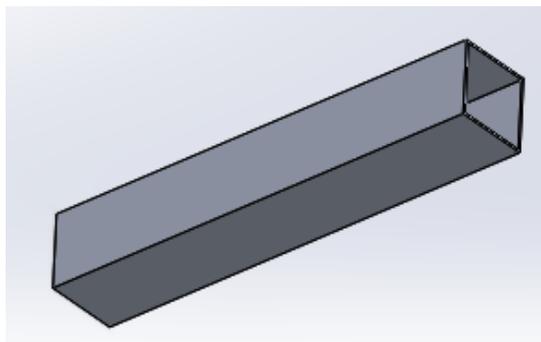
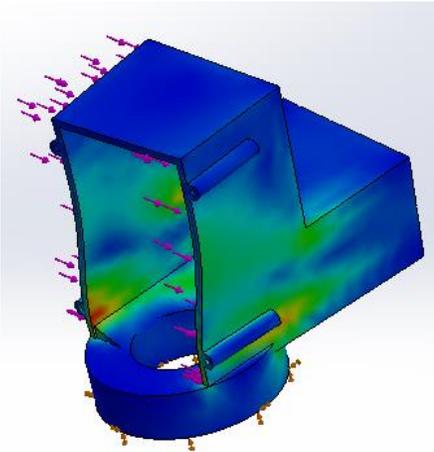
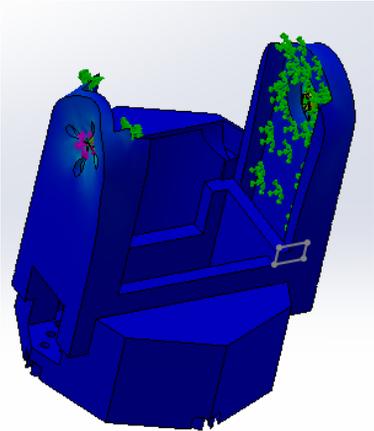
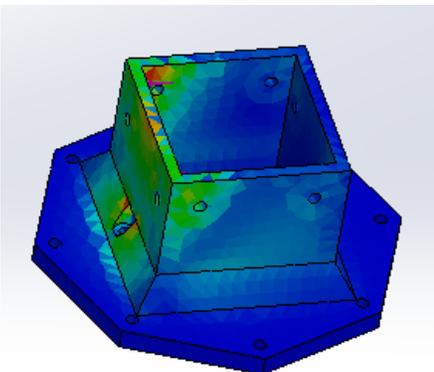


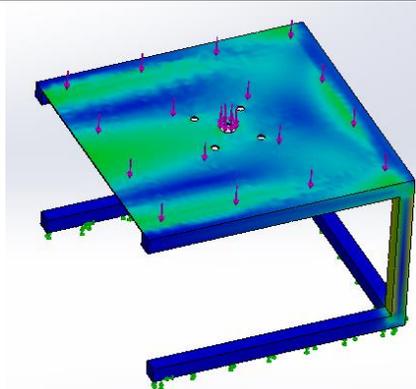
Figura 31 Eslabón antebrazo del robot manipulador

Para la etapa del brazo del robot manipulador se usaron los mismos acoples y eslabones ya diseñados con anterioridad lo que nos permite reducir costos de piezas diferentes que cumplirán con la misma función que las de etapa acoplada a la base.

Tabla 9
Análisis estático de los elementos del robot

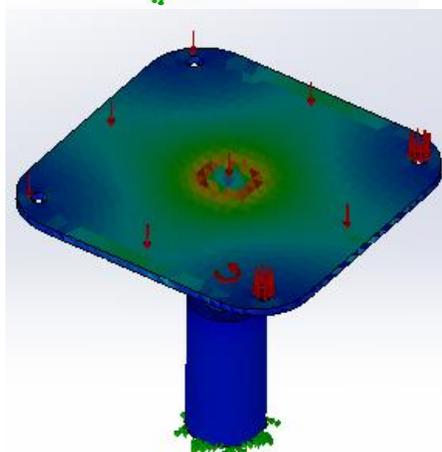
Elemento	Análisis estático
	<p>Base de Motor</p> <p>Esfuerzo Von Mises: $2.55 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 1.03×10^{-3} Desplazamiento Estático: $4.9 \times 10^{-1} \text{ (mm)}$</p>
	<p>Base de Actuador</p> <p>Esfuerzo Von Mises: $5.63 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 4.93×10^{-4} Desplazamiento Estático: $3.096 \times 10^{-3} \text{ (mm)}$</p>
	<p>Sujetador de eslabón</p> <p>Esfuerzo Von Mises: $1.08 \times 10^6 \text{ (N/m}^2\text{)}$ Deformación Unitaria: 2.86×10^{-4} Desplazamiento Estático: $4.59 \times 10^{-2} \text{ (mm)}$</p>

CONTINÚA



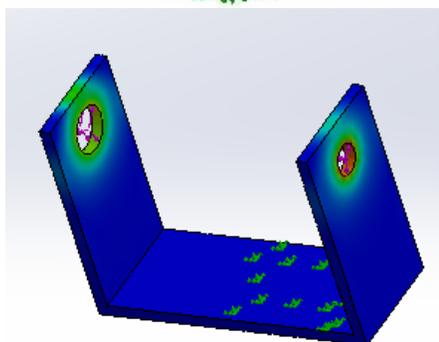
Base

Esfuerzo Von Mises: $5.67 \times 10^6 \left(\frac{N}{m^2}\right)$
Deformación Unitaria: 1.675×10^{-1}
Desplazamiento Estático: $2.55 \times 10^{-1} (mm)$



Eje base

Esfuerzo Von Mises: $4.45 \times 10^3 (N/m^2)$
Deformación Unitaria: 1.055×10^{-8}
Desplazamiento Estático: $7.063 \times 10^{-3} (mm)$



Sujetador de Actuador

Esfuerzo Von Mises: $1.58 \times 10^6 (N/m^2)$
Deformación Unitaria: 5.578×10^{-6}
Desplazamiento Estático: $5.024 \times 10^{-3} (mm)$

3.4.1.1. Selección del material Estructura

Las opciones más destacadas del material para el manipulador se describen en la Tabla 10, las mismas que se escogieron de acuerdo a la disponibilidad en el mercado local. Además de ser las opciones más viables en la construcción de un prototipo.

Tabla 10*Opciones de material para la estructura del robot manipulador*

	Solución	Características
A	Aluminio	-Costo: \$1800 -Ligero -Excelente para ambientes industriales -Factible maquinarlo y taladrarlo -Larga vida útil con cargas medias.
B	PLA (Impresión 3D)	-Costo: \$ 650 -Liviano -Facilidad de obtención del modelo propuesto -Larga vida útil con cargas bajas.
C	Perfiles de Acero galvanizado	-Costo: \$ 1400 -Ligero -Resistente a la corrosión -No necesita mantenimiento -Larga vida útil con grandes cargas

La siguiente etapa en el diseño es realizar una ponderación de criterios para optimizar la selección. La Tabla 21 presenta dicha ponderación teniendo un mayor valor el criterio más importante a tomar en cuenta para la selección.

Tabla 11*Ponderación en la selección del material*

Criterio	Costo	Peso	Capacidad de mecanizar	de Implementación	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	5	2,5	2,5	11	0,32
Peso	0	-	0	2,5	3,5	0,10
Capacidad de mecanizar	2,5	5	-	2,5	11	0,32
Implementación	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,25
				Total	34	1

A continuación, se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y

Tabla 25) y finalmente, de acuerdo con la ponderación alcanzada se selecciona una de las Opciones planteadas.

Tabla 12

Ponderación de costos para las Opciones del material

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	5	0	-	6	0,33
			Total	18	1

Tabla 13

Ponderación de peso para las Opciones del material

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 14

Ponderación de capacidad de mecanizar del material

Capacidad de mecanizar	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 15

Ponderación de implementación del material

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 26, se selecciona la solución con la preponderancia 1, por la prioridad de mantener el peso del brazo al mínimo. Por tanto, se selecciona PLA cuyas características se

observan en la Tabla 17 como material para la estructura del robot manipulador, además del aluminio cuyas propiedades son ver Tabla 18 para los eslabones más largos.

Los costos se realizaron de acuerdo varias cotizaciones a diferentes empresas que brindan el servicio ya sea de corte o impresión 3D.

Tabla 16

Conclusión en la selección de diseño para el material

Criterio	Costo	Peso	Capacidad de mecanizar	Implementación	Σ	Preponderancia
Solución A	0,018	0,034	0,108	0,083	0,243	2
Solución B	0,198	0,063	0,198	0,153	0,611	1
Solución C	0,108	0,006	0,018	0,014	0,145	3
Total					1,000	

Tabla 17

Propiedades del plástico PLA

Propiedades mecánicas	Unidad	Norma	PLA Impresión 3D
Esfuerzo de tracción a la deformación	<i>MPa</i>	ISO I DIN53453	39
Resistencia al Corte	$\frac{kJ}{m^2}$	ISO 179 DIN53453	12
Módulo de Elasticidad a la Tracción	<i>MPa</i>	ISO 527 DIN53457	1681,5
Esfuerzo de tracción a la rotura	<i>MPa</i>	ISO 178 DIN53458	33,9
Resistencia a la flexión	<i>MPa</i>	ISO 178 DIN53452	70,5
Alargamiento de Rotura	%	DIN53455	20

Fuente: (Buter, 2016)

Tabla 18
Propiedades del Aluminio

Propiedades mecánicas	Unidad	Norma	Aluminio
Límite Elástico	MPa	ISO AI 995	10-35
Resistencia al Corte	$\frac{kJ}{m^2}$	ISO AI 995	0.6
Módulo de Elasticidad a la Tracción	GPa	ISO AI 995	70.6
Esfuerzo de tracción a la rotura	MPa	ISO AI 995	70
Resistencia a la compresión	MPa	ISO AI 995	0,7

Fuente: (Cedal, 2016)

3.4.2. Diseño y selección de componentes de la Base

3.4.2.1. ANÁLISIS DE FUERZAS EN EL EJE

Para realizar el análisis de fuerza cortante y momento flector nos basamos en un software que nos ayudara a obtener los resultados de manera rápida y confiable.

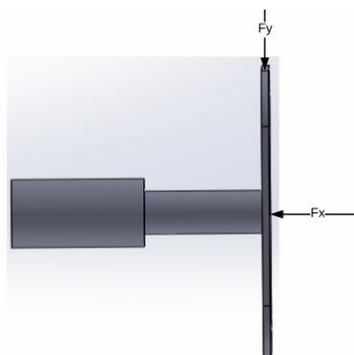


Figura 32 Diagrama de fuerzas en el eje motriz de la base

Diagrama con la fuerza tangencial.

$$F_y = 2,2 \text{ N}$$

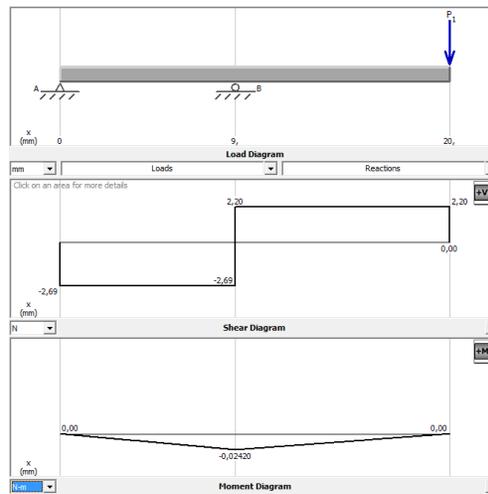


Figura 33 Diagrama de Fuerzas Tangenciales

Los valores de las reacciones en A y B en el plano z.

$$A_z = 2,69 \text{ N} \quad B_z = 2,2 \text{ N}$$

Diagrama con la fuerza radial

$$F_x = 1,6 \text{ N}$$

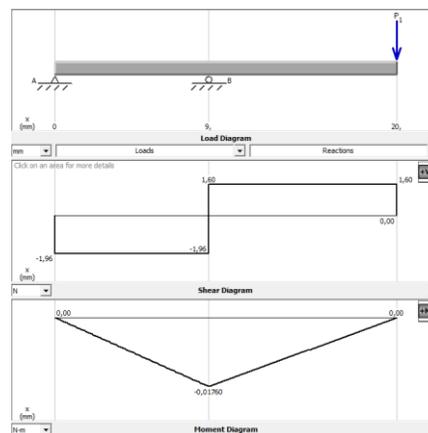


Figura 34 Diagrama de Fuerzas Radiales

Los valores de las reacciones en A y B en el plano y.

$$A_y = 1,96 \text{ N} \quad B_y = 1,6 \text{ N}$$

3.4.2.2. ANÁLISIS EN EL PUNTO DE REDUCCIÓN DE DIÁMETRO

Realizamos el análisis en el hombro pues existe una reducción de diámetro, por lo tanto, hay concentración de esfuerzo

Fuerzas tangenciales en 12 mm

Shear/Moment Along the Beam		
X-coordinate (mm)	12,00	Shear/Moment
Shear Force (N)	2,20	Close
Bending Moment (N-m)	-0,01760	

Figura 35 Fuerza y momento tangencial hombro eje a

Fuerzas radiales en 12 mm

Shear/Moment Along the Beam		
X-coordinate (mm)	12,00	Shear/Moment
Shear Force (N)	1,60	Close
Bending Moment (N-m)	-0,01280	

Figura 36 Fuerza y momento radial hombro eje a

Calculamos el momento resultante en el punto de concentración de esfuerzo donde los momentos producen mayor flexión.

$$M_a = \sqrt{0,0176^2 + 0,01280^2} = 0,0128 \text{ Nm}$$

En ese mismo punto debemos calcular el torque para poder realizar la primera iteración con el criterio de ED- Goodman según (Budynas & Nisbet, 2008).

$$T_m = W_{12}^t \left(\frac{d_1}{2} \right)$$

$$F_{12}^t = 1.6 \text{ N}$$

$$T_m = 0.744 \text{ Nm}$$

Entonces:

$$M_m = T_a = 0 \text{ Nm}$$

Se asume un filete de hombro de forma geométrica circular de manera generoso para lo cual de acuerdo al Anexo 9 se usan los siguientes factores de concentración.

$$k_t = 1.7 \quad k_{ts} = 1.5$$

Para dar un primer paso rápido y conservador utilizamos.

$$k_f = k_t = 1.7 \quad k_{fs} = k_{ts} = 1.5$$

Calculamos los factores de Marin que afectan a la viga de carga variable.

Factor de superficie (ka).

Al usar un acero laminado en frío, de acuerdo al Anexo 1 se eligen los factores.

$$a = 1.5$$

$$b = -0.265$$

$$S_{ut} = 630 \text{ MPa}$$

$$k_a = a S_{ut}^b = 4.51 * 630^{-0.265}$$

$$k_a = 0.817$$

Factor de tamaño (kb).

Utilizaremos un factor de tamaño de $k_b = 0.85$

Factor de carga (k_c)

$$k_c = 1 \text{ Flexión}$$

Factor de temperatura (k_d).

La temperatura del eje, el robot está diseñados para trabajar a temperaturas de 20 grados Celsius, que es la temperatura promedio en las distintas provincias del Ecuador.

$$k_d = 1$$

Factor de confiabilidad (k_e).

Se elige una confiabilidad del 95% de Anexo 3, para lo cual se usa

$$k_e = 0.868$$

Aplicando la ecuación de Marin.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e 0.5 S'_e$$

$$S_e = 0.817 \times 0.85 \times 0.868 \times 0.5 \times 630 \text{ MPa}$$

$$S_e = 218.75 \text{ MPa}$$

Elegimos un factor de seguridad de 2.5.

Mediante el Criterio ED-Goodman se obtiene un diámetro aproximado

Teniendo en cuenta.

$$M_m = T_a = 0 \text{ Nm}$$

La ecuación queda.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right) \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{16 \times 2.5}{\pi} \left\{ \frac{2(1.7 \times 0.0128)}{218.76 \times 10^6} + \frac{[3(1.5 \times 0.744)^2]^{1/2}}{630 \times 10^6} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.011 \text{ m} = 11.44 \text{ mm}$$

Se elige por lo tanto un tamaño estándar de 20 mm, ya que en el mercado la menor disponible es la chumacera con rodamiento incrustado de 20mm.

Esfuerzo de Von Mises

Procedemos a calcular los esfuerzos de Von Mises en base a las ecuaciones siguientes.

$$\sigma'_a = \frac{32k_f M_a}{\pi d^3} \quad (7-5)$$

$$\sigma'_a = \frac{32 * 1.55 * 0.018}{\pi(0.020)^3} = 0.035 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16k_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16 \times 1.3 \times 0.7441}{\pi(0.02)^3} \right)^2 \right]^{1/2} = 0.28 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de tamaño real (kb) ver Anexo 8

$$k_b = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.107}$$

$$k_b = \left(\frac{20}{7.62} \right)^{-0.107} = 0.9020$$

Los demás factores permanecen inalterables.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e$$

$$S_e = 0.817 * 0.902 * 0.868 * 0.5 * 630 \text{ MPa}$$

$$S_e = 201.49 \text{ MPa}$$

Procedemos a calcular el factor de seguridad con el criterio de Goodman.

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{0.035}{201.49} + \frac{0.128}{630}$$

$$n_f = 515.54$$

Este valor es suficiente para el diseño del eje.

3.4.3. Análisis de volcamiento en la Estructura

La estructura base debe tener un peso necesario para no ceder ante una fuerza aplicada al extremo del brazo de un valor $F = 0.5 \text{ kg}$, se ejecuta un análisis de volcamiento de la estructura, el cual se apoya en el cálculo de un Momento Volcador el cuál se puede calcular con la fuerza máxima que soportara la estructura base ($F = 0.5 \text{ kg}$) y la distancia medida desde el centro de inercia hasta el extremo donde se aplica la Fuerza $dy = 186 \text{ mm}$, y el cálculo del momento estabilizador el cual es el peso propio de la estructura P y la distancia entre su recta de acción $dx = 93 \text{ mm}$, al ya obtener los dos momentos y tomando un factor de seguridad estándar $n = 1.5$

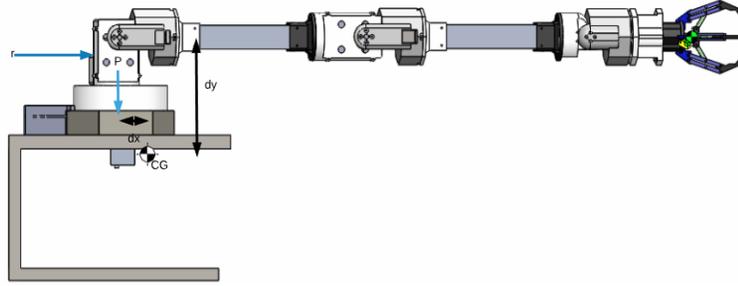


Figura 37 Análisis de Volcamiento

En la Figura 37 se muestra el esquema de fuerzas que operan en la estructura

Cálculos:

Momento volcador:

$$M_v = F(g)(dy) \quad (3.1)$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P(g)(dx) \quad (3.2)$$

Relación de momentos para el factor de seguridad fs :

$$\frac{M_e}{M_v} \geq fs \quad (3.3)$$

Se sustituye la ecuación (3.1) en la ecuación (3.2) y (3.3)

De la cual obtenemos P:

$$P = \frac{fs(F)(dy)}{dx}$$

$$P = \frac{1.5(1)(186)}{93}$$

En donde resulta que el peso mínimo debe ser de $P = 3 \text{ kg}$

En la estructura realizada tiene un peso de 4 kg, por lo tanto, el factor de seguridad real $n_r = 2$ que es suficiente para que la estructura no tienda a volcarse.

3.4.4. Selección de cojinete para el eje motriz de la base del robot

Las fuerzas que actúan sobre los rodamientos son las fuerzas que actúan en el eje calculado con anterioridad se indican en la Figura 38

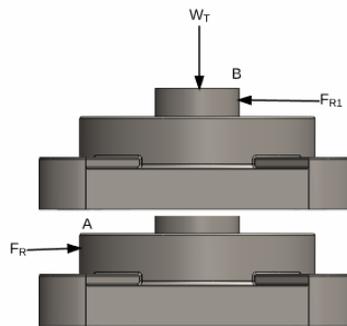


Figura 38 Fuerzas presentes en los rodamientos de la base

Se plantea una confiabilidad de 99%. La velocidad del eje intermedio es de 80 RPM.

Reacciones en el eje a.

Los valores de las reacciones en A y B en el plano z.

$$A_z = 1.69 \text{ N} \quad B_z = 2.2 \text{ N}$$

Los valores de las reacciones en A y B en el plano y.

$$A_y = 1.96 \text{ N} \quad B_y = 2.6 \text{ N}$$

La suma total es:

$$A = 2.5 \text{ N } B = 3.4 \text{ N}$$

Vida de diseño

En el Anexo 12 se puede apreciar un tipo de aplicación similar a la tratada, una máquina para servicio de 8 h, que no siempre se usa completamente.

De la tabla del podemos estimar a vida útil del cojinete que vamos a seleccionar.

$$Vida (kh) = 14 - 20$$

Donde el diseño del cojinete tendrá una vida útil de 16000 h.

La vida en revoluciones puede expresarse como:

$$L_D = 16000 \text{ h} \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) (80 \text{ rpm}) = 76800000 \text{ rev}$$

$$L_D = 7.6 \times 10^7 \text{ rev}$$

$$x_D = \frac{7.6 \times 10^7 \text{ rev}}{10^6 \text{ rev}} = 768$$

La ecuación puede utilizarse para convertir de una situación de diseño con una carga, vida y confiabilidad deseadas a una carga nominal de catálogo.

Se utilizará un cojinete de bolas, en el eje que utilizaremos por lo tanto $a = 3$:

$$C_{10} = a_f F_D \left[\frac{X_D}{x_0 + (\theta - x_0)(1 - R_D)^{\frac{1}{b}}} \right]^{1/a}$$

Los parámetros de Weibull para esta aplicación son:

$$x_0 = 0.02$$

$$(\theta - x_0) = 4.439$$

$$b = 1.483$$

Utilizamos un factor de aplicación de 1.2

$$C_{10} = F_{RB} = 2.18 \text{ kN}$$

Según el catálogo en Anexo 13 se observa que existen varios cojinetes que se acoplan a nuestros requerimientos, escogemos el menor para no sobredimensionar los parámetros calculados.

Escogemos un cojinete insertable que pertenece a la chumacera UCF204 cuyo diámetro es 20mm

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$D = 47 \text{ mm}$$

$$B = 31 \text{ mm}$$

3.4.5. Diseño del Manipulador

Para el diseño del manipulador se analizan Opciones en lo que se refiere al tipo de mecanismo, material del mismo de acuerdo a las características de los objetos que se desea manipular.

3.4.5.1. Tipo de Mecanismo

Se refiere a la configuración del mismo es decir las partes y la forma como se relacionan para su correcto funcionamiento. Existen varios tipos de mecanismos para manipuladores los cuales pueden ser utilizadas de acuerdo con los requerimientos de velocidad de accionamiento, carga del objeto a manipular, entre otros.

3.4.5.2. Opciones de diseño

Mecanismos subactuados

El mecanismo subactuado es capaz de generar únicamente una función o trayectoria ver Figura 39, está diseñado de tal forma que permite realizar ciertas modificaciones para cambiar la forma de tomar los objetos (cilíndrico, palmar, puntual, esférico, etc.), sin embargo es necesario reconfigurar físicamente la estructura del mecanismo.

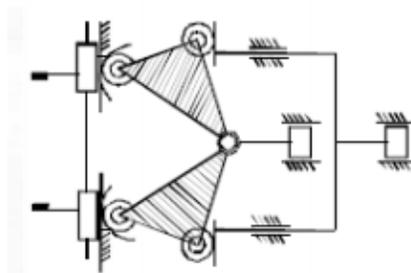


Figura 39 Mecanismo Subactuado para manipulador
Fuente: (Kelly & Santibañez, 2008)

Características:

- Puede manipular desde 0 hasta 5kg
- La sujeción puede aumentar si se recubre con un material que aumente la fricción y realiza los dos tipos de agarre.

- Tiempo de apertura y cierre del Gripper de mayor a 1s
- Los dedos del Gripper son dos veces los de la mano humana.
- Existe movimiento relativo al mismo tiempo en cada dedo.
- Bajo costo, solo requiere el diseño del mecanismo.
- Número de elementos va de 18 a 22

Mecanismo por polea y cable

Se encuentra formado por poleas y cables Figura 40 que le permiten transmitir el movimiento.



Figura 40 Mecanismo por polea y cable.
Fuente: (Ferre, Aracil, & Sanchez Uran, 2008)

Características:

- Puede manipular desde 0 hasta 2kg-
- La sujeción es insuficiente y cuenta con los dos tipos de agarre
- Tiempo de apertura y cierre del Gripper mayor a 1 s.
- Los dedos son 3 veces los de la mano humana.
- El movimiento es secuencial, en cada dedo.
- Costo medio, requiere un mecanismo compuesto de poleas y cables
- Número de elementos va de 30 a 45

Estructura por engranes cónicos

Mecanismo usando engranajes cónicos que proporcionan la transmisión del movimiento de la articulación a través de las articulaciones anteriores. Ver Figura 41

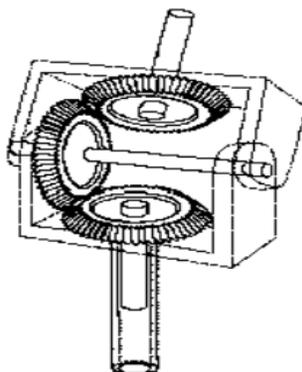


Figura 41 Mecanismo compuesto por engranajes cónicos.
Fuente: (Ferre, Aracil, & Sanchez Uran, 2008)

- Puede manipular desde 0 hasta 5kg.
- Posee una excelente sujeción y realiza los dos tipos de agarre.
- Realiza la operación en 1 segundo.
- Los dedos son 3 veces los de la mano humana
- Existe movimiento relativo al mismo tiempo en cada dedo.
- Costo alto debido a que requiere 24 engranes cónicos y diseño del mecanismo.
- Número de elementos va de 27 a 35

3.4.5.3. Evaluación y selección de Opciones

Al analizar los requerimientos planteados inicialmente, se procede a elegir el mecanismo subactuado debido a las siguientes apreciaciones:

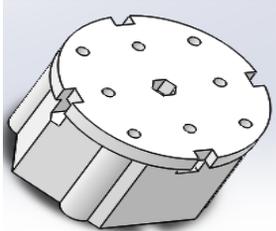
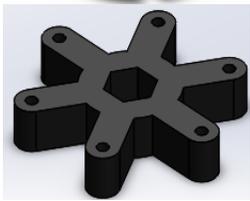
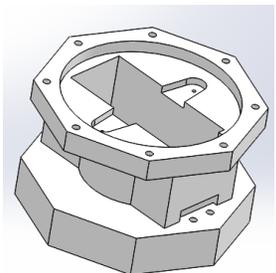
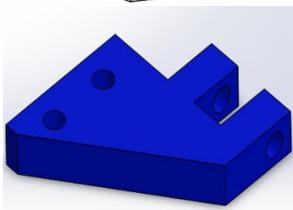
- Se requiere manipular objetos de baja carga.
- Tiempo de apertura y cierre del Gripper de aproximadamente 15s
- Se requiere que sea económica.
- Número de elementos es de menor a 20 piezas que se considera bajo para el tiempo de manufactura

3.4.5.4. Modelado del efector final

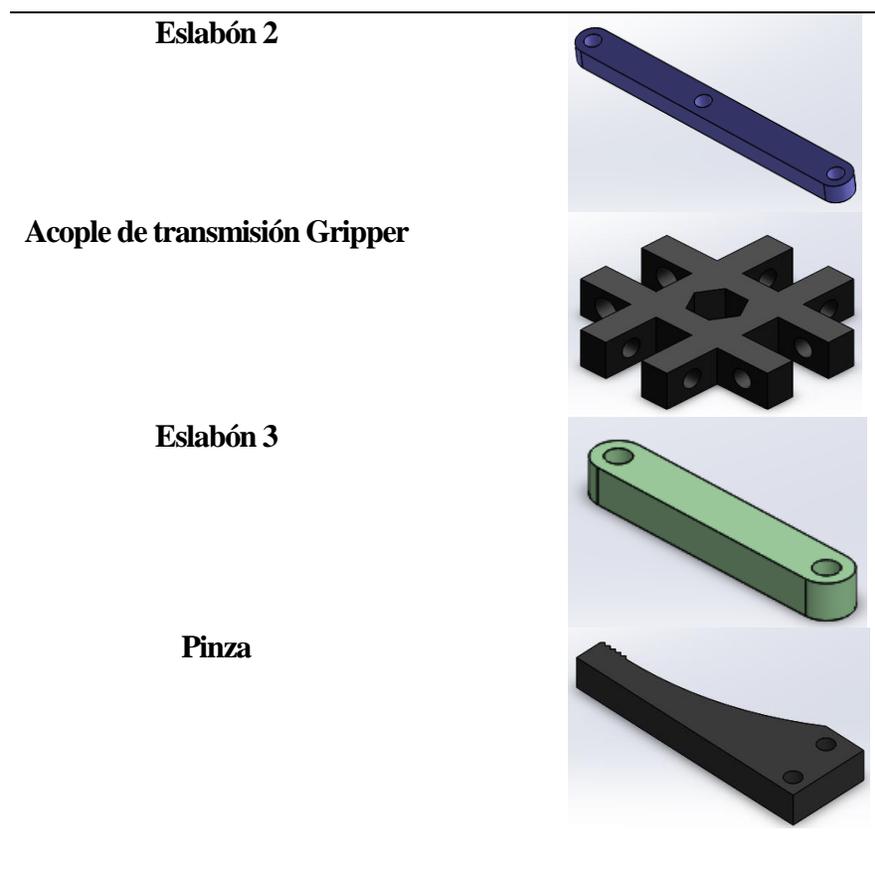
Se modeló los elementos que conforman el efector final

Tabla 19

Elementos que conforman el efector final

Pieza	Modelo
Base el Gripper	
Soporte de la base del Gripper	
Acople del Gripper	
Eslabón 1	

CONTINÚA



Y al ser ensamblado queda como Figura 42

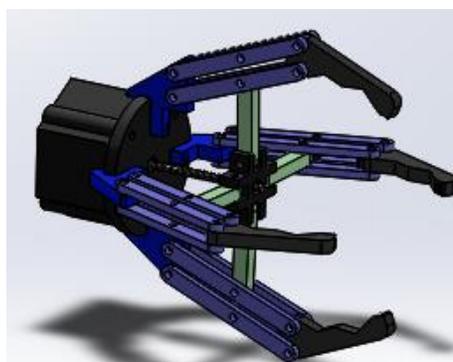


Figura 42 Efecto final del robot manipulador

Las Opciones más destacadas del material para el efecto final se describen en Tabla 20.

Tabla 20
Opciones de material para el manipulador

	Material	Características
A	Acrílico	-Costo: \$8 -Liviano -Factibilidad de uso en ambiente industriales -Disposición al corte y taladrado
B	PLA	-Costo: \$36 -Liviano -Factibilidad de trabajar en ambientes húmedos. - Disposición al corte y taladrado
C	MDF	-Costo: \$ 6 -Ligero -Factibilidad en corte láser

La siguiente etapa en el diseño es realizar una ponderación de criterios para optimizar la selección. La Tabla 21 presenta dicha ponderación teniendo un mayor valor el criterio más importante a tomar en cuenta para la selección.

Tabla 21
Ponderación de criterios de evaluación para el material

Criterio	Costo	Peso	Capacidad de mecanizar	de Implementación	$\sum+1$	Ponderación
Costo	-	5	2,5	2,5	11	0,32
Peso	0	-	0	2,5	3,5	0,10
Capacidad de mecanizar	2,5	5	-	2,5	11	0,32
Implementación	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,25
				Total	34	1

A continuación, se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y

Tabla 25 y finalmente, de acuerdo con la ponderación alcanzada se selecciona una de las Opciones planteadas.

Tabla 22*Ponderación de costos del material del manipulador*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	5	0	-	6	0,33
			Total	18	1

Tabla 23*Ponderación de peso del material del manipulador*

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,33
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1

Tabla 24*Ponderación de capacidad de mecanizar del material del manipulador*

Capacidad de mecanizar	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1

Tabla 25*Ponderación de implementación del material del manipulador*

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,19
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,19
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1

Analizando los datos conseguidos en Tabla 26 se selecciona la solución con preponderancia 1, que nos permite cumplir con las especificaciones iniciales. Por tanto, se selecciona PLA como material para las partes complejas y para eslabones simples se tomó la opción de uso de acrílico.

Tabla 26
Conclusión en la selección de diseño para el material del manipulador

Criterio	Costo	Peso	Capacidad de mecanizar	Implementación	Σ	Preponderancia
Solución A	0,108	0,034	0,153	0,049	0,344	2
Solución B	0,108	0,006	0,153	0,118	0,384	1
Solución C	0,108	0,063	0,018	0,083	0,272	3
Total					1,000	

3.5. Subsistema 2. Sistema Potencia

Para diseñar la estructura del robot manipulador es necesario la consideración de las cargas a la que estarán sometidos cada uno de los elementos para ello se realiza los cálculos detallados a continuación.

3.5.1. Dinámica de robot con Euler Lagrange

Existe una metodología generalizada para aplicar en robots de n grados de libertad (Ollero Baturone, 2001)

$\kappa(\theta, \dot{\theta})$ *Energía cinética asociada con cada articulación*

$M(\theta)$ *Matriz de inercia $n \times n$*

$\theta \in \mathbb{R}^n$ *Vector de las posiciones de las articulaciones*

$\mathcal{U}(q)$ *Energía potencial*

El lagrangiano se define como:

$$\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} - \mathcal{U}(\theta)$$

$$\kappa(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left[\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right] \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right] + \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} = \tau$$

$$\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left[\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right] = M(\theta) \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left[\frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right] \right] = M(\theta) \ddot{\theta} + \dot{M}(\theta) \dot{\theta}$$

Ecuaciones de Movimiento

$$M(\theta) \ddot{\theta} + \dot{M}(\theta) \dot{\theta} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left[\dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right] + \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta} = \tau$$

El modelo completo para un robot de n grados de libertad es:

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + g(\theta) + f(\dot{\theta}) = \tau \quad (3.4)$$

Donde:

$$C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} = \dot{M}(\theta) \dot{\theta} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left[\dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} \right]$$

$$g(\theta) = \frac{\partial u(\theta)}{\partial \theta}$$

$C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Matriz de la fuerza centrífuga y de Coriolis

τ Vector de las fuerzas externas

$g(\theta)$ Par gravitacional

Para calcular la Coriolis utilizamos los símbolos de Chistoffel: (Romeo Ortega, 1998)

$$c_{ijk}(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial M_{kj}(\theta)}{\partial \theta_i} + \frac{\partial M_{ki}(\theta)}{\partial \theta_j} + \frac{\partial M_{ij}(\theta)}{\partial \theta_{ik}} \right]$$

$$c_{kj}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} c_{1jk}(\theta) \\ c_{2jk}(\theta) \\ \vdots \\ c_{njk}(\theta) \end{bmatrix}^T \dot{\theta}$$

Para el caso propuesto analizamos la dinámica en la base pues es la parte más crítica se analiza los dos primeros nodos del robot, cuyo modelo es:

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} C_{11}(\theta, \dot{\theta}) & C_{12}(\theta, \dot{\theta}) & C_{13}(\theta, \dot{\theta}) \\ C_{21}(\theta, \dot{\theta}) & C_{22}(\theta, \dot{\theta}) & C_{23}(\theta, \dot{\theta}) \\ C_{31}(\theta, \dot{\theta}) & C_{32}(\theta, \dot{\theta}) & C_{33}(\theta, \dot{\theta}) \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} g_1(\theta) \\ g_2(\theta) \\ g_3(\theta) \end{bmatrix} = \tau$$

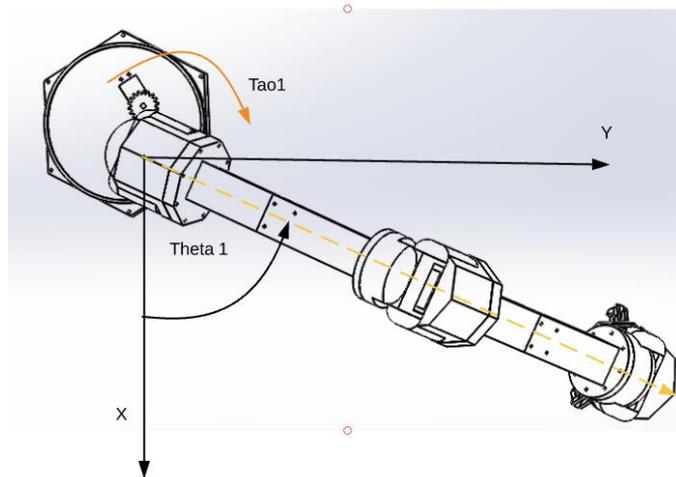


Figura 43 Esquema con theta 1

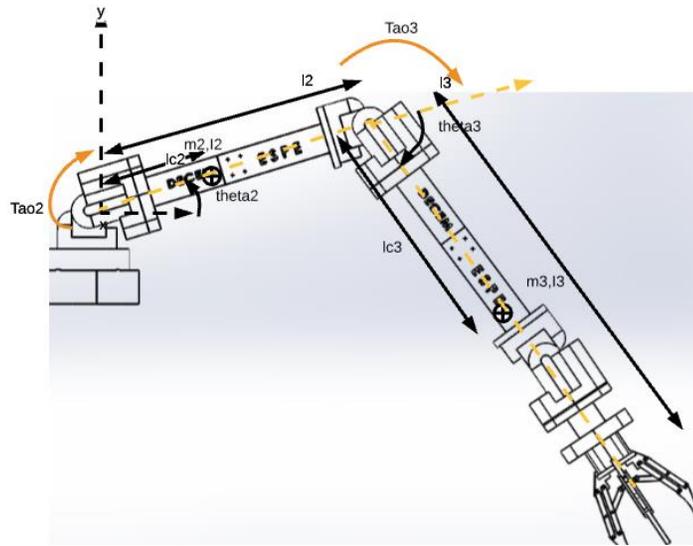


Figura 44 Esquema con θ_2 y θ_3 para el cálculo de Euler-Lagrange

Componentes de la matriz de Inercia

$$M_{11}(\theta) = (m_3 l_{c3} + I_3) \cos(\theta_3)^2 + 2l_2 m_3 l_{c3} \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) + (m_2 l_{c2} + l_2^2 m_3 + I_2) \cos(\theta_2)^2$$

$$M_{12}(\theta) = 0$$

$$M_{13}(\theta) = 0$$

$$M_{21}(\theta) = 0$$

$$M_{22}(\theta) = 2l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_2) \cos(\theta_3)) + m_3 l_{c3} + I_3 + \theta_3$$

$$M_{23}(\theta) = l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_2) \cos(\theta_3)) + m_3 l_{c3} + I_3$$

$$M_{31}(\theta) = 0$$

$$M_{32}(\theta) = l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_2) \cos(\theta_3)) + m_3 l_{c3} + I_3$$

$$M_{33}(\theta) = m_3 l_{c3} + I_3$$

Componentes de la matriz de Coriolis

$$c_{11}(\theta, \dot{\theta}) = -((m_2 l_{c2} + l_2^2 m_3 + I_2) \cos(\theta_2) + l_2 m_3 l_{c3} \cos(\theta_3)) \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 - (m_3 l_{c3} + I_3) \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) \dot{\theta}_3 - l_2 m_3 l_{c3} \sin(\theta_3) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_3$$

$$c_{12}(\theta, \dot{\theta}) = (m_2 l_{c2} + l_2^2 m_3 + I_2) \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 - l_2 m_3 l_{c3} \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) \dot{\theta}_1$$

$$c_{13}(\theta, \dot{\theta}) = -(m_3 l_{c3} + I_3) \sin(\theta_3) \cos(\theta_3) \dot{\theta}_1 - l_2 m_3 l_{c3} \sin(\theta_3) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1$$

$$c_{21}(\theta, \dot{\theta}) = (m_2 l_{c2} + l_2^2 m_3 + I_2) \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 + l_2 m_3 l_{c3} \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) \dot{\theta}_1$$

$$c_{22}(\theta, \dot{\theta}) = l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_3) \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) \cos(\theta_3)) (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3)$$

$$c_{23}(\theta, \dot{\theta}) = -l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_3) \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) \cos(\theta_3)) (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)$$

$$c_{31}(\theta, \dot{\theta}) = (m_3 l_{c3} + I_3) \sin(\theta_3) \cos(\theta_3) \dot{\theta}_1 + l_2 m_3 l_{c3} \sin(\theta_3) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1$$

$$c_{32}(\theta, \dot{\theta}) = 2l_2 m_3 l_{c3} (\sin(\theta_3) \cos(\theta_2) - \sin(\theta_2) \cos(\theta_3)) \dot{\theta}_2$$

$$c_{33}(\theta, \dot{\theta}) = 0$$

Par gravitacional

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial P}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial P}{\partial \theta_3} \end{bmatrix}$$

$$g_1(\theta) = 0$$

$$g_2(\theta) = (m_2 l_{c2} + l_2 m_3) \times g \times \cos(\theta_2)$$

$$g_3(\theta) = m_3 l_{c3} g \cos(\theta_3)$$

$$g(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_2 l_{c2} + l_2 m_3) \times g \times \cos(\theta_2) \\ m_3 l_{c3} g \cos(\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ M(\theta)^{-1}[\tau(t) - C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - g(\theta) - f(\dot{\theta})] \end{bmatrix}$$

Modelo Completo

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{11}M_{22}M_{33} + M_{12}M_{23}M_{31} + M_{13}M_{21}M_{32} - M_{13}M_{22}M_{31} - M_{12}M_{21}M_{33} - M_{11}M_{23}M_{32}} \begin{pmatrix} M_{22}M_{33} - M_{23}M_{32} & M_{22}M_{31} - M_{21}M_{33} & M_{21}M_{32} - M_{22}M_{31} \\ M_{32}M_{13} - M_{33}M_{12} & M_{33}M_{11} - M_{31}M_{13} & M_{31}M_{12} - M_{32}M_{11} \\ M_{12}M_{23} - M_{13}M_{22} & M_{13}M_{21} - M_{11}M_{23} & M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

Obtenemos los parámetros del modelo de la figura 10 y los mostramos en la Tabla 27. Cabe destacar que estos parámetros son aproximaciones de las simulaciones del software, que para obtener mejores resultados se los incrementó un 10%, lo que nos permite acercarnos a los valores de peso reales, cuyos resultados de torques aplicados serán suficientes para mantener el factor de seguridad del diseño original.

Tabla 27

Parámetros del robot antropomórfico

Parámetro	Notación	Valor	Unidad
Longitud del eslabón 1	l_2	0,34	m
Longitud del eslabón 2	l_3	0,52	m
Masa del eslabón 1	m_1	0,62	kg
Masa del eslabón 2	m_2	1,77	CONTINÚA

Masa del eslabón 3	m_3	1,77	kg
Centro de masa del eslabón 2	l_{c2}	0,14	m
Centro de masa del eslabón 3	l_{c3}	0,28	m
Momento de Inercia 1	I_1	$7,5 \times 10^{-3}$	$kg.m^2$
Momento de Inercia 2	I_2	0,05	$kg.m^2$
Momento de Inercia 3	I_3	0,05	$kg.m^2$
Coefficiente de Rozamiento 1	b_1	0,48	$Nm - seg$
Coefficiente de Rozamiento 2	b_2	0,48	$Nm - seg$
Coefficiente de Coulomb 1	fc_1	7,17 si $\dot{\theta}_1 > 0$ y 8,05 si $\dot{\theta}_1 < 0$	Nm
Coefficiente de Coulomb 2	fc_2	1,734	Nm
Aceleración de la Gravedad	g	9,81	$\frac{m}{s^2}$
Torque articulación 1	τ_1	18	Nm
Torque articulación 2	τ_2	15	Nm
Torque articulación 3	τ_3	15	Nm

A continuación, desarrollamos una simulación Figura 45 para determinar el comportamiento del torque de las articulaciones, de acuerdo al cambio de posición angular de las mismas.

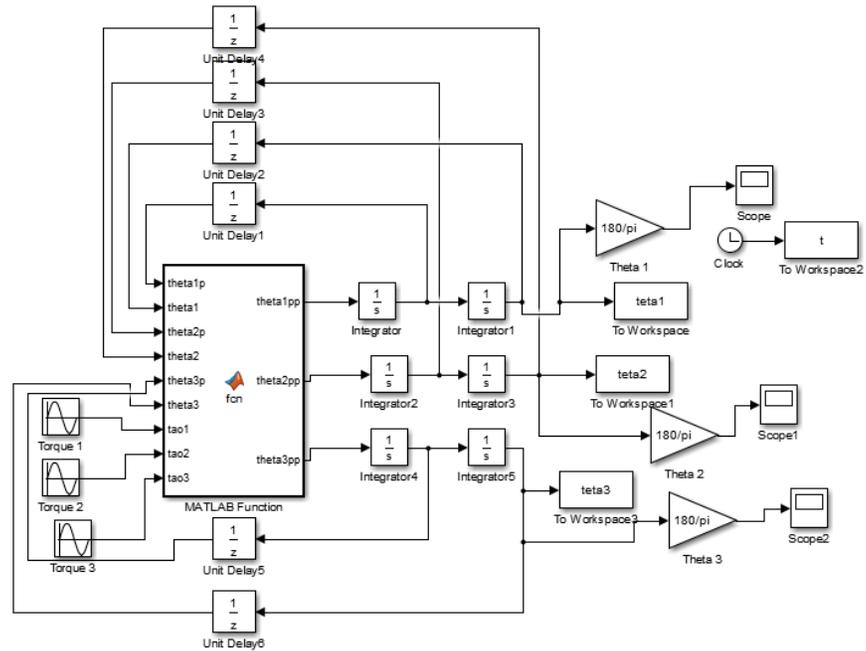


Figura 45 Diagrama de bloques del modelo

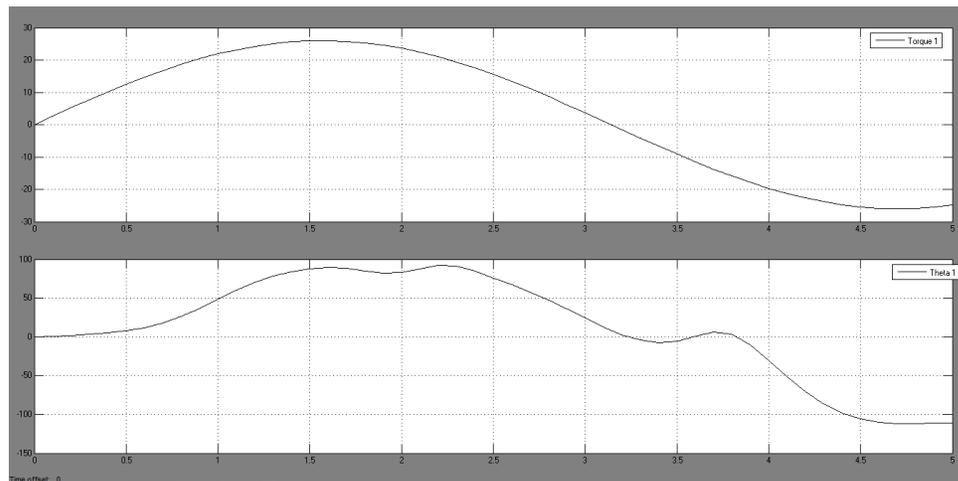


Figura 46 Respuesta theta1 del modelo a un T1= 28 Nm

En Figura 46 se puede analizar que en el comportamiento dinámico el robot, aumenta el valor del torque cuando se encuentra en una posición específica respecto a los demás, es decir, el torque aumenta en una determinada disposición en las que se encuentren las articulaciones.

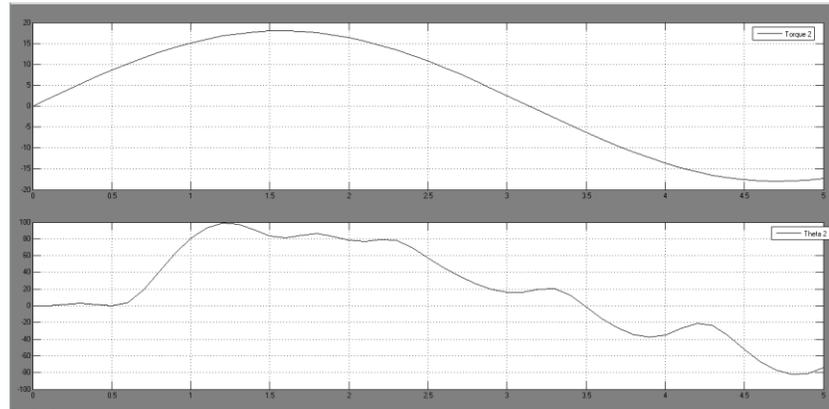


Figura 47 Respuesta theta2 del modelo a un $T_2 = 16$ Nm

En el caso de la articulación del hombro de la base como se ve en la Figura 47 se requiere un torque máximo cuando el ángulo oscila en valores altos con respecto a la vertical.

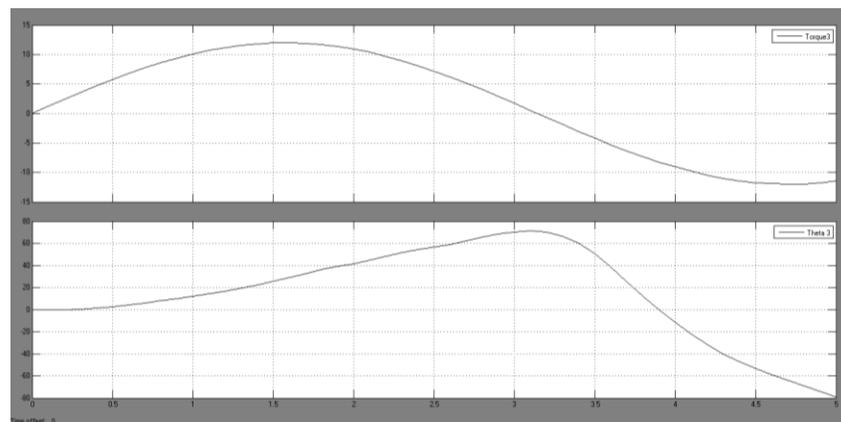


Figura 48 Respuesta theta3 del modelo a un $T_3 = 12$ Nm

En el caso del codo del robot al estar en una posición intermedia no requiere altos torque sin embargo se tiene en cuenta q en ángulos bajos con respecto a la vertical este último tiene a maximizarse.

3.5.2. Selección de Actuadores

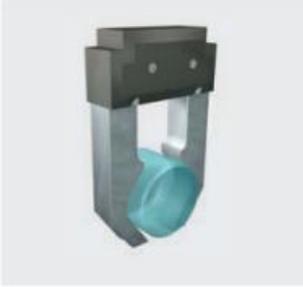
a) Motor para el Gripper

El mecanismo elegido para el Gripper fue el de tipo subactuado. A continuación, se realizará el análisis de la fuerza que es transmitida al girar el tornillo a los dedos del Gripper; lo cual asegura el cierre o apertura del mismo para tomar o soltar un objeto.

Como primer instante se analizará la fuerza de rozamiento entre el objeto y el Gripper

Tabla 28

Efectos cinéticos sobre la fuerza de agarre requerida por pinza

Opciones de Instalación	Dirección de la aceleración	Fuerza/fuerza de agarre requerida por pinza
		$F_G = m(a_z + g) \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S$
		$F_{G;z} = mg \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S \quad F_{G;x} = ma_x \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S$
		$F_{G;z} = mg \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S \quad F_{G;y} = ma_y \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S$
		$F_G = m(a_z + g) \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2} S$
		$F_G = m \left(a_x + g \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2} \right) S$
		$F_{G;z} = mg \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2} S \quad F_{G;y} = ma_y \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S$
		$F_G = m(a_z + g) S$
		$F_G = m \left(g + a_x \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2} \right) S$
		$F_{G;z} = mg S$

CONTINÚA

$$F_{G,y} = ma \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2\mu} S$$

Fuente: (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005)

μ : Coeficiente de rozamiento entre PLA y plástico: 0,48 Fuente: (Vilanova , 2015)

F_r : Fuerza de rozamiento

F_G : Fuerza de apriete

a_z : aceleración central

α : Ángulo de apertura del gripper: 33°

S = Factor de seguridad: 1.5

$m = 0,2 \text{ kg}$

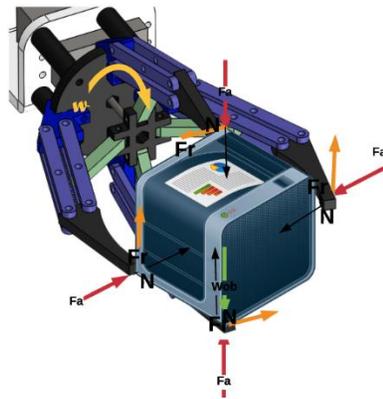


Figura 49 Diagrama de fuerzas que intervienen en el Gripper

Como la pinza recoge el objeto estando en forma vertical Figura 50, pues tiene que levantarlo para colocarlo en otra posición se aplica la ecuación (3.5) (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005)

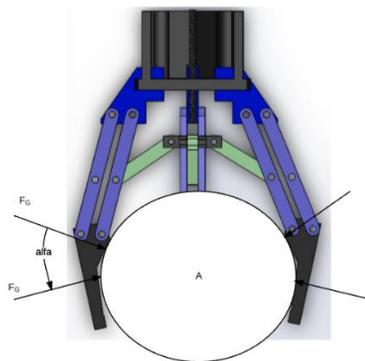


Figura 50 Esquema de fuerzas de contacto cuando el manipulador toma un objeto

$$F_G = m(a_z + g)S \quad (3.5)$$

$$F_G = 0,2kg \left(1,5 \frac{m}{s^2} + 9,8 \frac{m}{s^2} \right) 1,5$$

$$F_G = 3,4 \text{ N}$$

Al estar las líneas efectivas de una pieza de trabajo para levantar y caer. Además de que son exactamente paralelas al peso, para calcular la fuerza de agarre se utiliza la ecuación (3.6)

$$F_H = mg \left(1 + \frac{a}{g} \right) \quad (3.6)$$

$$F_H = 0,2kg * 9,8 \frac{m}{s^2} \left(1 + \frac{1,5}{9,8} \right)$$

$$F_H = 2,26 \text{ N}$$

$$FT = \sqrt{F_H^2 + F_G^2}$$

$$FT = 4,1 \text{ N}$$

Tornillo de Potencia:

En la Figura 51 se representa el mecanismo, el cual tiene la aplicación a las fuerzas F_T que se distribuyen entre los 4 dedos del Gripper.

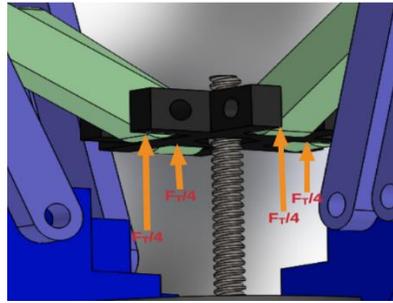


Figura 51 Esquema del Mecanismo

Se obtiene el par necesario τ_M para subir una carga de valor F_T usando un tornillo de rosca cuadrada.

(Mott, 2010)

$$\tau_M = \frac{F_T D_p}{4} \left(\frac{L + \pi f D_p}{\pi D_p - f L} \right) \quad (3.7)$$

Donde:

D_p : Diámetro primitivo del tornillo M3: 2,35 mm

L : Avance del tornillo: 0,8 mm

f : Coeficiente de fricción entre la tuerca y el tornillo: 0,74

F_s = Factor de seguridad: 1,5

$$\tau_M = 0,11 \text{ N.m}$$

$$\tau_M = 0,11 \text{ N.m} \times F_s$$

$$\tau_M = 0,17 \text{ N.m} = 1,5 \text{ lb.in}$$

A continuación, se determina la velocidad requerida del tornillo para encontrar la potencia que se obtendrá del motor. Se parte de los requerimientos inicialmente planteados, uno de los cuales fue que el tiempo de apertura del Gripper sea de 45 segundos. Además, con la asistencia del software CAD se determina que el recorrido de la tuerca en el tornillo será de 11 mm.

n: Velocidad angular del motor del Gripper

D_s: Distancia recorrida por la tuerca = 11 mm

p: Paso del tornillo: 0,5 mm

$$v = \frac{D_s}{t} \quad (3.8)$$

$$n = 0,92 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 110 \text{ RPM}$$

Una vez obtenida la velocidad angular, la misma se utiliza calcular la potencia necesaria que se requiere del motor como a continuación:

$$P_{mgr} = \tau_m \times \frac{n}{6300}$$

$$P_{mgr} = 0,026 \text{ HP} = 9,4 \text{ W}$$

b) Motor con rotación en la muñeca

Para encontrar el motor adecuado a ser implementado en cada articulación se realiza el análisis de cada una. Para obtenerlo se usa el siguiente principio:

$$T = F \times d \quad (3.9)$$

A partir de esta ecuación podemos ir aplicando a cada articulación según la distancia que exista entre cada nodo en donde se colocará el actuador respectivo.

$\omega_{m_{gr}}$: Peso del motor del gripper con su acople

d_{m_1} : Longitud del acople motor del gripper

d_{ac_1} : Distancia del acople del motor greapper

ω_{gr} : Peso del gripper

d_{cg} : Distancia al centro de gravedad del gripper

T_{m_1} : Torque motor uno

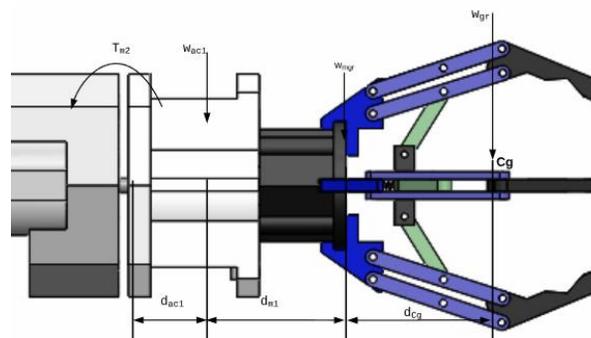


Figura 52 Momento de inercia para el Motor 1

Con la fórmula de la velocidad angular se obtiene el tiempo que se necesitaría para alcanzar su posición máxima que sería media vuelta o 180° .

$$\omega = 1,2 \frac{rad}{s}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

$$\Delta t = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\bar{\omega}}$$

$$\Delta t = 2,62 \text{ seg}$$

A continuación, asumimos que parte del reposo y encontramos la aceleración angular

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

$$\bar{\alpha} = 0,46 \text{ rad/s}^2$$

A continuación, encontramos la Inercia del brazo

$$I = M \times r_g^2 \quad (3.10)$$

$$I = 0,021 \text{ kg.m}^2$$

$$\mathcal{M}_2 = I \times \alpha$$

$$\mathcal{M}_2 = 9,63 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

- Velocidad

$$v = w \times r_{giro}$$

$$w = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$w = 37,04 \text{ rad/s}$$

- Potencia

$$P_1 = \mathcal{M}_2 \times w$$

$$P_1 = 0,35 \text{ W}$$

c) Motor con rotación axial (Motor 2)

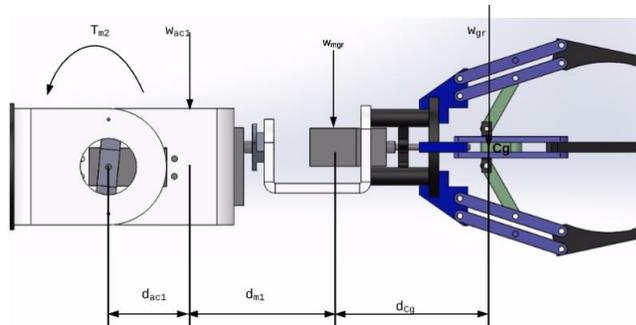


Figura 53 Articulación entre la muñeca y el Gripper del robot manipulador

$$\tau_{m2} = \omega_{gr} \times (d_{ac1} + d_{m1} + d_{cg}) + \omega_{mgr} \times (d_{ac1} + d_{m1}) + \omega_{ac1} \times (d_{ac1})$$

$$\tau_{m2} = 2,53 \text{ N.m}$$

- Velocidad

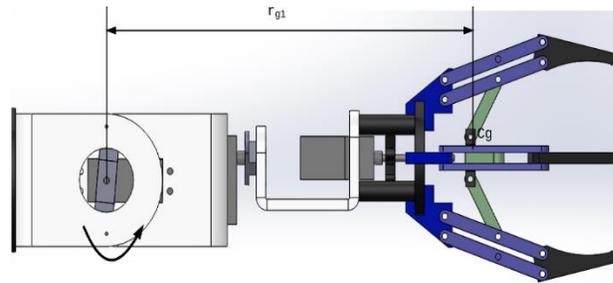


Figura 54 Radio de giro para el motor 2 en la muñeca del robot

$$v = w \times r_{giro}$$

$$w = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$w = 2,5 \text{ rad/s}$$

- Potencia

$$P_2 = \tau_{m2} \times w$$

$$P_2 = 6,33 \text{ W}$$

d) Motor en la articulación del codo en rotación (Motor 3)

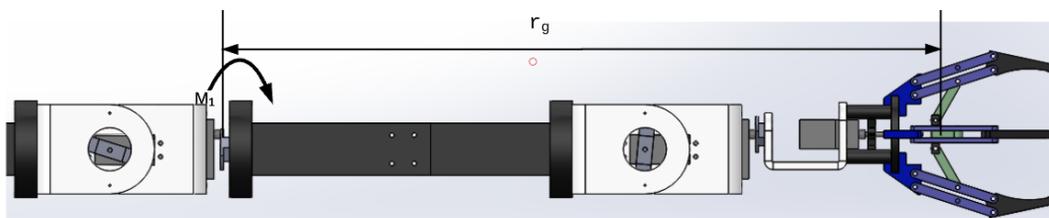


Figura 55 Momento de inercia para el motor 3

$$I = M \times r_g^2$$

$$I = 0,4182 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\mathcal{M}_1 = I \times \alpha$$

$$\mathcal{M}_1 = 0,192 \text{ N.m}$$

- Velocidad

$$v = w \times r_{giro}$$

$$w = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$w = 20.62 \text{ rad/s}$$

- Potencia

$$P_3 = M_1 \times w$$

$$P_3 = 3,97 \text{ W}$$

e) **Motor en la articulación del codo en rotación (Motor 4)**

Los torques necesarios para los 3 motores restantes obtenidos con la dinámica son:

$$\text{Motor: } \tau_{m4} = 12 \text{ Nm}$$

- Velocidad

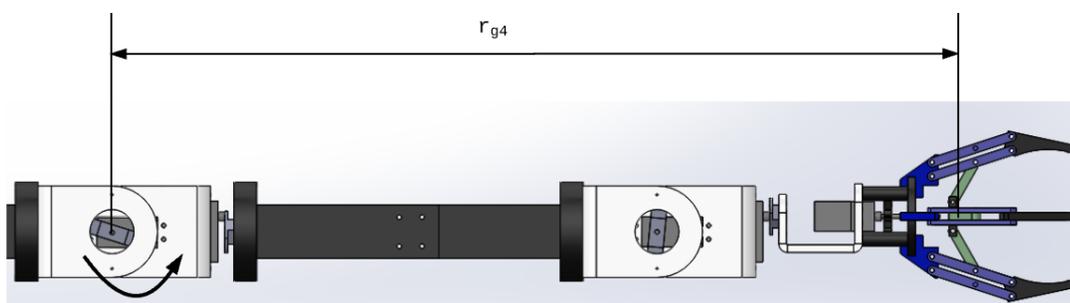


Figura 56 Radio de giro para el motor 4

$$\omega = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$\omega = 4,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- Potencia

$$P_4 = \tau_{m4} \times \omega$$

$$P_4 = 20.91 \text{ W}$$

f) Motor en la articulación del codo en rotación (Motor 5)

Los torques necesarios para los 3 motores restantes obtenidos con la dinámica son:

Motor5:

$$\tau_{m5} = 16 \text{ N.m}$$

- Velocidad

$$\omega = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$\omega = 3.28 \frac{rad}{s}$$

- Potencia

$$P_5 = \tau_{m4} \times \omega$$

$$P_5 = 52.63 \text{ W}$$

g) Motor en la articulación del codo en rotación (Motor 6)

El momento de esta articulación fue obtenida al realizar los cálculos del eje de la base en cual con las chumaceras se redujo de 28 Nm al valor siguiente:

Motor6: $\tau_{m6} = 0.0128 Nm$

- Velocidad

$$\omega = \frac{v}{r_{giro}}$$

$$\omega = 3.28 \frac{rad}{s}$$

- Potencia

$$P_6 = \tau_{m4} \times \omega$$

$$P_6 = 0.421 W$$

3.5.2.1. Opciones de Actuadores

Con los resultados obtenidos en los cálculos de la anterior sección tanto de la cinemática como la dinámica, se selecciona motores para cada articulación. Se va a utilizar actuadores de tipo eléctrico debido a la precisión y facilidad del control en el movimiento. Se han tomado varios parámetros del motor para esta selección ver Tabla 29, entre ellos el peso, costo y potencia en este último se toma en cuenta la mayor potencia requerida que es del motor de la base el cual es de 57 Watts.

Los costos de los motores fueron tomados del proveedor de importaciones ya que no son comunes en el mercado local, lo que encarece aún más su valor en el medio, se debe tener cuidado con la adecuada selección de acuerdo a los torques requeridos, ya que el tiempo de importación es un punto relevante en la planificación del diseño y construcción.

Tabla 29
Características en Marcas de Servomotores

Parámetro	Dynamixel MX-64R	TowerPro MG959 Servo	ASMC 03B	RDS 3115
Potencia	72 W	24 W	90W	11w
Voltaje	24 V	6 V	24v	6v
Velocidad	50 RPM	71 RPM	180 RPM	25 RPM
Torque	96 Nm	12 Nm	176 Nm	14.7 Nm
Peso	126 g	55 g	530 g	55 g
Precio	\$ 407	\$ 14	\$ 150	\$ 25
Control	Autocontrol	Requiere controlador	Requiere controlador	Requiere controlador

Fuente: (ServoDatabase Servo Specifications and Review, 2009)

Por lo tanto, se elige ASMC 03B Servo tomando en consideración principalmente que la potencia máxima requerida no sobrepasa los 57 W, pero limitando el hecho del rendimiento del motor de 70% no se puede elegir Dynamixel MX-64R. El costo es el más bajo del servo ASMC 03B se debe al requerimiento de un controlador adicional para la implementación. El peso es un punto importante ya que los motores estarán sobre el manipulador al no tener ninguna forma de transmisión de potencia, como se ve en la Figura 57:

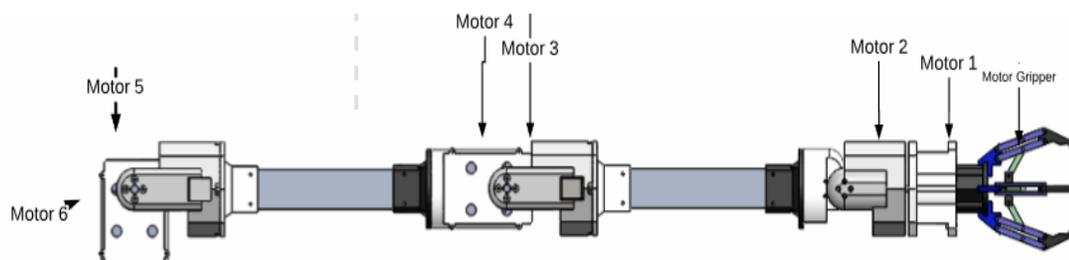


Figura 57 Ubicación de los motores

Tabla 30*Características Técnicas de los motores requeridos y elegidos*

Motor	Potencia W	Torque Nm	RPM	Motor seleccionado
Motor1	0.421	0.0128	35,3	Motor RDS3115
Motor2	52.63	16	24	ASMC 03B
Motor3	20.91	12	19	ASMC 03B
Motor4	3.97	8,96	10	Tower Pro MG959 Servo
Motor5	6.3	18,13	6,4	RDS 3115
Motor6	0.35	10,07	19,6	Tower Pro MG959 Servo
Motor Gripper	9	0,17	110	Tower Pro MG959 Servo

3.6. Subsistema 3. Control del Sistema

Para dirigir el sistema completo se utiliza una tarjeta de control es la encargada de estar al mando del robot, manipular el movimiento de los actuadores, admitir la información de los sensores, y realizar la comunicación entre PC y Robot.

3.6.1. Tipo de microcontrolador

El microcontrolador es el dispositivo que nos permite ejecutar el algoritmo de control, y el encargado de encausar los datos provenientes de sensores en este caso de Kinect. De la selección del correcto controlador permite el control eficiente del sistema.

Tabla 31*Los requerimientos para el microcontrolador*

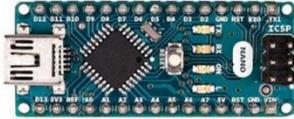
Requerimientos	Descripción
Interfaz SPI y USB	Para comunicación
Al menos 2 entradas Analógicas (AI)	Para lectura de sensores
Al menos 7 salidas PWM	Para control de servomotores
Velocidad mínima del reloj	16 MHz

Analizando los requerimientos de la Tabla 31 se decide realizar la selección entre 3 tipos de plataformas de desarrollo que pueden cumplir con estos requerimientos como son Arduino, Raspberry y Odroid, sin embargo, no son microcontroladores, aunque basan su tecnología en los mismos, cuentan con algunas ventajas: son de bajo costo, se las puede adquirir fácilmente en el mercado, y se operan mediante software libre.

3.6.1.1. Opciones de dispositivos de control

Tabla 32

Características técnicas de plataformas de desarrollo comerciales

	Arduino	Raspberry Pi	Odroid
			
Precio	\$9	\$65	\$90
Tamaño	1.8 x 4.5 x 1.9 cm	8.6 x 5.4 x 1.7 cm	8.9 x 5.9 x 1.3
Velocidad de reloj	16 MHz	700 MHz	2 GHz
Voltaje de entrada	7 a 12 V	5 V	5 V DC Micro USB, 6-15 VD Power Jack
Consumo de corriente	42 mA	700mA	850 mA
Capacidad Entradas analógicas	6-10 bits	N/A	8-12 bits
PWM	6	2	8
SPI	1	1	1
TWI/I2C	2	1	2
Entorno de desarrollo integrado (IDE)	Arduino	Scratch, IDLE, Raspbian	Ubuntu, Android

Analizado las Opciones de la Tabla 32 se decide adquirir un Arduino Uno, debido a que presenta un costo de adquisición muy bajo, sus características técnicas satisfacen las necesidades establecidas además de poseer

la capacidad analógica en tiempo real facilitando la lectura de sensores analógicos, lo que Raspberry Pi y Odroid no poseen.

3.6.2. Medio de Transmisión de Datos

El medio de transmisión de datos permitirá la comunicación entre el robot recolector de objetos y el computador.

Tabla 33

Medios de transmisión de datos

	Comunicación Serial	Comunicación Bluetooth
Tipo de comunicación	Asíncrona/Síncrona	Asíncrona/Síncrona
Velocidad de Transmisión	115 Mb/s	24 Mb/s
Alcance máximo	1200 m	30 m
Tipo de conexión	Alámbrica	Inalámbrica
Buffer máximo	640 bits	343 bits

3.6.2.1. Opciones de diseño

Opciones de medio de comunicación entre PC y tarjeta de control

Tabla 34

Medios de comunicación entre la Pc y tarjeta de control

Solución	Imagen	Características
USB a TTL		-Costo: \$ 5 -Tamaño de datos: 1 bit de inicio+ 5 a 8 bits de datos + 1 bit de parada -Velocidad: 112 Kbps
HC-05		Costo: \$7.5 -Tamaño de datos: 8 bits de datos+ 1 bit parada -Velocidad: 2 a 3 Mbps

Analizado las Opciones de la Tabla 34 se decide realizar la comunicación serial, debido a que presenta un costo de adquisición bajo, y las características son ideales para la transmisión de datos por ende el control efectivo del robot.

3.6.3. Diseño final de la Tarjeta de control

3.6.3.1. Diseño electrónico de la Tarjeta de control

La conexión para el control de los motores en donde se tiene una fuente principal que es de 12 v con un convertidor de 12-5v los motores de la base servo 2 y 3 obtienen su alimentación directamente de la fuente principal.

Los puertos digitales del microcontrolador permiten obtener la señal para el giro del ángulo necesario para mover el motor en la dirección especificada.

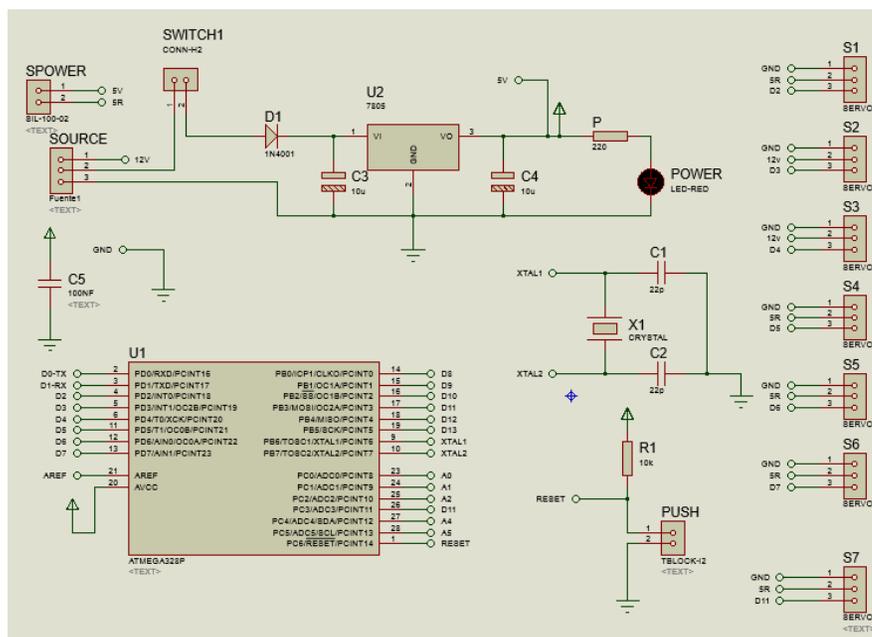


Figura 58 Esquema de conexión de la tarjeta de control

3.7. Subsistema 4. Sistema de Visión Artificial

Para el control del robot se requieren de varios parámetros entre ellos, los ángulos que debe girar para posicionarse en el espacio, considerando también que el sensor Kinect permite crear un sistema de lazo cerrado con la visualización de la posición del objeto y realizar la función principal, la cual es la recolección de objetos. Para ellos es necesario la aplicación de algoritmos que nos permitan obtener dichos valores.

Entonces es necesario resolver la posición del objeto en el espacio utilizando las cámaras y sensores que posee el dispositivo KINECT.

3.7.1. Desarrollo del algoritmo de visión artificial

3.7.1.1. Algoritmo de control del sistema de visión artificial

El algoritmo de visión artificial se establece para la identificación de objetos por colores. La programación se la realiza en software.

El sistema debe ser capaz de diferenciar los objetos que se encuentre frente al dispositivo Kinect. Los colores que son reconocidos en la ejecución del algoritmo son: Verde, amarillo

El proceso de visión artificial inicia al declarar las variables iniciales, que permiten capturar el objeto, el HMI de control es desarrollada para el uso de varias funciones, una de ellas es la posibilidad de que el usuario elija recoger el objeto.

Al activar la función de visión artificial con el botón etiquetado con “Visión” se activa el dispositivo de Kinect de manera que ejecute la detección de objetos.

Utilizando los parámetros HSV de los colores a reconocer, se utilizan los valores máximos y mínimos representados en este tipo de formato en una máscara individual el cual es un frame en blanco y negro ver Figura 59.



Figura 59 Máscara en formato HSV obtenido con la Kinect

La función `inRange` de OpenCv funciona de la siguiente manera tenemos un arreglo de pixeles, en cada posición contiene valores en el rango de 0-255 bits que son tomados por la cámara del Kinect, de acuerdo a los colores establecidos inicialmente se ingresan 2 arreglos (pueden ser escalares) por cada color como base de datos, estos últimos corresponden al rango RGB correspondientes al rango superior e inferior. A continuación, se realiza la comparación de la base de datos con los argumentos obtenidos con la cámara ver

$$dst(I) = lowerb(I)_0 \leq src(I)_0 \leq upperb(I)_0 \quad (3.11)$$

Donde:

$src(I)_0$: Arreglo o escalar de entrada

$lowerb(I)_0$: Limite inferior del color a buscar

$upperb(I)_0$: Limite superior del color a buscar

$dst(I)$: Arreglo o escalar de salida de la función

La conversión de colores es realizada por la función COLOR_BGR2HSV de OpenCV la cual hace las operaciones de la Figura 60.

$$\begin{aligned}
 V_{max} &\leftarrow \max(R, G, B) \\
 V_{min} &\leftarrow \min(R, G, B) \\
 L &\leftarrow \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \\
 S &\leftarrow \begin{cases} \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} & \text{if } L < 0.5 \\ \frac{V_{max} - V_{min}}{2 - (V_{max} + V_{min})} & \text{if } L \geq 0.5 \end{cases} \\
 H &\leftarrow \begin{cases} 60(G - B)/(V_{max} - V_{min}) & \text{if } V_{max} = R \\ 120 + 60(B - R)/(V_{max} - V_{min}) & \text{if } V_{max} = G \\ 240 + 60(R - G)/(V_{max} - V_{min}) & \text{if } V_{max} = B \end{cases}
 \end{aligned}$$

Figura 60 Operaciones realizadas para a conversión de RGB a HSV

En el desarrollo del algoritmo se dispone a encerrar dentro de un cuadrado todos los puntos encontrados en área específica dependiendo de cada color, se utiliza la información recolectada para dibujar un punto en el centroide del cuadrado. Por tanto, se busca todos los objetos que sean detectados y que cumplan con alguna de las máscaras creadas y si el lado del cuadrado detectado es mayor a 25 se determina y se dibuja el centroide de la misma en las coordenadas XZ Figura 61.

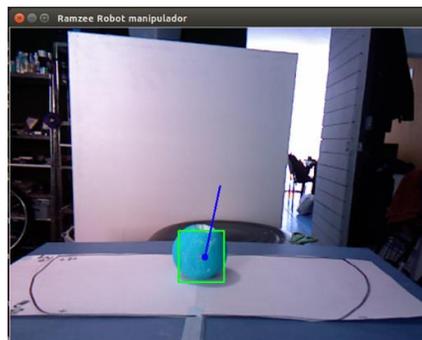


Figura 61 Captura de la posición del objeto por color

Cuando los objetos colocados en el área de visión de la KINECT corresponden a tonalidades diferentes o colores no compatibles con los establecidos en el rango inicial, no se realiza ninguna acción sobre el frame de video capturada y continúa explorando en cada frame hasta que en un frame se encuentra el área necesaria para considerar que existe un objeto del color buscado.

En la Figura 62, se observa el diagrama de flujo del algoritmo de control del sistema de visión artificial.

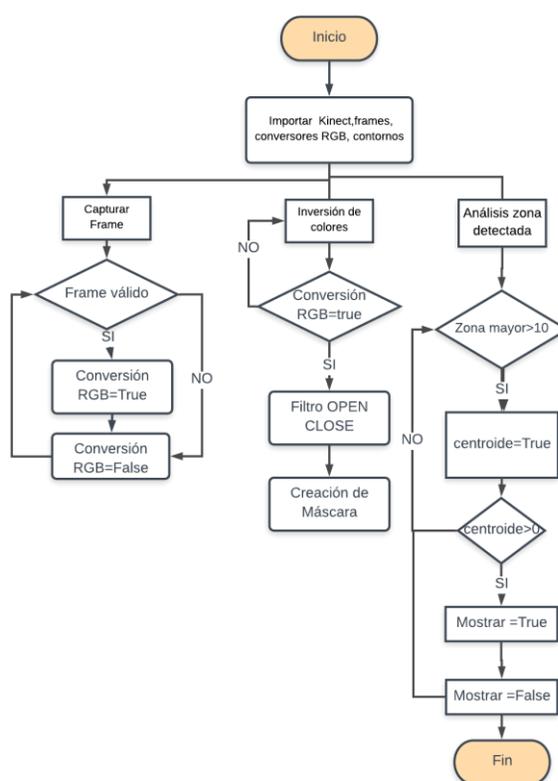


Figura 62 Algoritmo del sistema de control de visión artificial

Al obtener el centroide correspondiente al objeto detectado obtenemos los parámetros x , z en el plano XZ, aun se requiere la distancia de la base del robot al objeto, es decir el parámetro y en plano XY.

Con la librería Freenect obtenemos el parámetro Depth que es la profundidad del objeto detectado, cabe destacar que el parámetro profundidad aumenta su precisión mientras la distancia del objeto al sensor sea mayor a 80cm de acuerdo a las especificaciones del fabricante ver Tabla 35

Tabla 35
Características de Dispositivo Kinect

Característica	Valor
Campo de visión horizontal:	57 grados
Campo de visión vertical:	43 grados
Rango de inclinación física:	± 27 grados
Rango de profundidad del sensor:	0,8 – 3,5 metros
Flujo de datos 320x240	@ 30fps
Flujo de datos 640x480	@ 30fps

Fuente: (Microsoft, 2017)

Los datos obtenidos en el centroide del plano xz están medidos de acuerdo a los pixeles del frame capturado, para obtener los valores x , y en cm hacemos una relación entre el frame y un entorno proyectado.

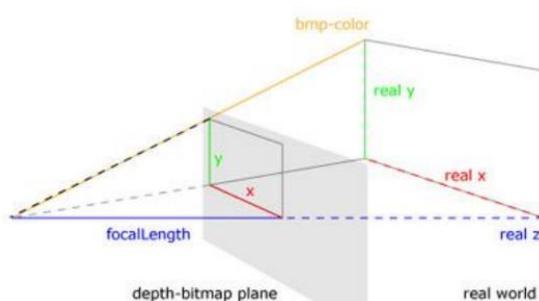


Figura 63 Esquema para la transformación de pixeles a cm del entorno
Fuente: (Makhal, 2015)

De las coordenadas X , Y del espacio real. Al grabar escenas con la Kinect se puede elegir bien el espacio real (x , y , z en cm) o bien el ‘espacio Kinect’ donde $x = (0 - xmax)$, $y = (0 - ymax)$ estando z en cm de coordenadas reales. Encontramos por tanto que un incremento en x de una unidad en el ‘espacio Kinect’ no equivale a la misma distancia en el espacio real (en cm) dependiendo de cuál sea la profundidad a la que se encuentran esos dos puntos. (Makhal, 2015)

Entonces es para obtener x , y reales se utiliza las siguientes ecuaciones:

Donde

$$x = (i - xmax) \times a \times z \quad (3.12)$$

$$y = (j - ymax) \times a \times z \quad (3.13)$$

Donde $a = 0.017366$ el cual es el parámetro de ajuste para pasar de unas coordenadas a otras. (Makhal, 2015)

i : Parámetro x en pixeles obtenidas del frame que devuelve Kinect

j : Parámetro y en pixeles obtenidas del frame que devuelve Kinect

z : Parámetro de profundidad que devuelve Kinect

$xmax$: Parámetro x propio de la resolución de la cámara

$ymax$: Parámetro y propio de la resolución de la cámara

3.8. Subsistema 5. Posicionamiento del Robot

Una vez obtenido tanto el centroide como la profundidad del objeto en coordenadas reales, se procede a calcular el posicionamiento que robot tendrá una vez, que se ha definido los valores x, y, z del efector final.

3.8.1. Posicionamiento Inicial

Para la obtención de los ángulos de las articulaciones se requiere la utilización del método de Denavit-Hartenberg el cual nos permite obtener los ángulos para que el extremo del robot vaya a la posición $P(x, y, z)$ en el caso de Cinemática Inversa, y obtener la posición $P(x, y, z)$ del efector final partir de los ángulos de las articulaciones, aplicando Cinemática Directa.

Los ángulos de posicionamiento inicial Figura 64 **Tabla 49** que nos permiten obtener los parámetros iniciales para la realización del algoritmo de Denavit-Hartenberg utilizando los argumentos fijos del robot manipulador ver Tabla 36.

$$q = \left[\frac{\pi}{2} \quad 0 \quad \frac{\pi}{2} \quad 0 \quad \frac{\pi}{2} \quad \frac{\pi}{2} \right]$$

Figura 64 Ángulos de posicionamiento inicial

Tabla 36

Argumentos fijos del robot manipulador

Eslabón	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	$\theta_1 + \frac{\pi}{2}$	0,18m	0	$+\frac{\pi}{2}$
2	θ_2	0	0,38	0
3	θ_3	0	0	$+\frac{\pi}{2}$
4	θ_4	0,39m	0	$-\frac{\pi}{2}$
5	θ_5	0	0	$+\frac{\pi}{2}$
6	θ_6	0,26m	0	0

Para obtener la matriz T de posicionamiento inicial del robot, realizamos la cinemática directa, ya que al tener los ángulos fijos se tiene una idea clara de cómo se posiciona:

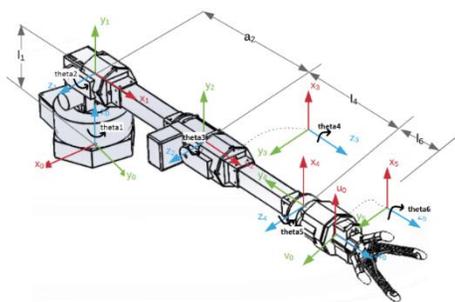


Figura 65 Esquema de los parámetros para el posicionamiento del robot

Se establecen las matrices de transformación, con el fin de encontrar la Matriz T a partir los parámetros suscitados anteriormente.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Aplicando el algoritmo de Cinemática Directa con los datos que obtenemos el matiz T inicial en la que se encuentra los parámetros iniciales del robot ver Figura 66 .

T =				
-1.0000	0	-0.0000	-0.0000	
-0.0000	1.0000	0.0000	770.0000	
0.0000	0.0000	-1.0000	-80.0000	
0	0	0	1.0000	

Figura 66 Matriz de transformación de la posición inicial del manipulador

Luego ploteamos los valores de la matriz de transformación con los cuales obtenemos la gráfica de la Figura 67. Así se verifica que la posición inicial es la requerida.

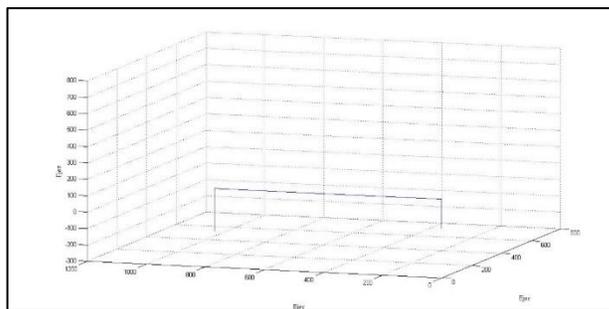


Figura 67 Posicionamiento inicial del robot manipulador de objetos

3.8.2. Cinemática Inversa aplicado a Robot Antropomórfico de 6 GDL

Para calcular los ángulos θ_i se considera la separación de la posición y orientación del extremo del robot.

Inicialmente se calculan las tres primeras articulaciones las cuales permiten al robot posicionarse en las coordenadas (p_x, p_y, p_z) , el cuál es la intersección de las secciones de posicionamiento y orientación del robot, los 3 últimos grados de libertad nos permite orientar al efector final respecto al punto anterior.

Cálculo de las 3 articulaciones para posicionar el robot

Articulación 1

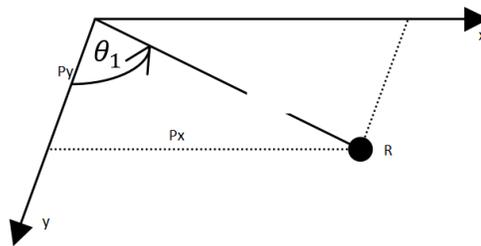


Figura 68 Esquema ángulo de la base

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

$$\sin \theta_1 = \frac{P_x}{R}$$

$$\cos \theta_1 = \frac{P_y}{R}$$

$$\theta_1 = \text{atan}^{-1} \left(\frac{P_x}{P_y} \right) \quad (3.14)$$

Articulación 2

En este caso tenemos dos formas en las que se puede posicionar el codo por llamarlo de alguna manera, estas son sobre la articulación o bajo su posición por lo tanto tendremos dos posibles soluciones que se llaman codo Arriba y codo Abajo. El ángulo θ_2 se calculará con la suma o resta de los ángulos α y β como lo muestra la Figura 69.

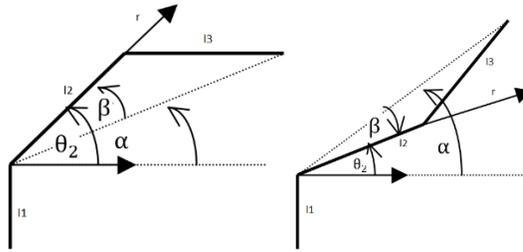


Figura 69 Configuración CODO ARRIBA (a) Configuración CODO ABAJO (b)

Relacionando la posición actual con las calculadas anteriormente obtenemos:

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + (p_z - l_1)^2}$$

$$l_3^2 = r^2 + l_2^2 - 2rl_2 \cos \beta$$

$$\cos \beta = \frac{l_3^2 - r^2 - l_2^2}{-2rl_2}$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_3^2 - r^2 - l_2^2}{-2rl_2} \right) \quad (3.15)$$

$$\sin \alpha = \frac{l_1 - p_z}{r}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{l_1 - p_z}{r} \right) \quad (3.16)$$

$$\theta_2 = \alpha + \beta \text{ Codo Arriba}$$

$$\theta_2 = \alpha - \beta \text{ Codo abajo}$$

Articulación 3

Como en el caso de la articulación anterior se toma en cuenta que se puede obtener 2 configuraciones del codo como se puede ver en la Figura 70.

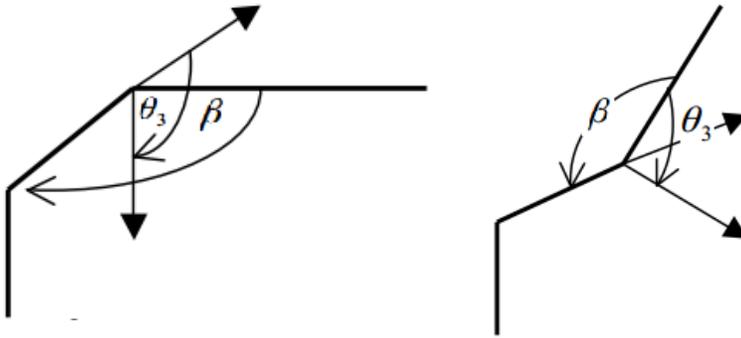


Figura 70 Configuración CODO ARRIBA (a) Configuración CODO ABAJO

$$\theta_3 = \frac{3\pi}{2} - \beta \text{ Configuración codo arriba}$$

$$\theta_3 = \beta - \frac{\pi}{2} \text{ Configuración codo abajo}$$

Cálculo de las articulaciones de Orientación

Determinados los ángulos correspondientes al posicionamiento del robot se procede a encontrar los ángulos de orientación, que son dependientes de los ya calculados.

Para lo cual primero obtenemos la matriz de transformación 0A_3 para las primeras 3 articulaciones, resuelta con cinemática directa, la cual es necesaria para resolver la orientación del robot.

De acuerdo a (Romeo Ortega, 1998), para resolver la orientación se debe conseguir que las últimas articulaciones cumplan las siguientes consideraciones:

- a) Establecer la articulación 4 de forma tal que una rotación respecto de la rotación 5 alineará el eje de movimiento de la articulación 6 con el vector de aproximación dado (a).

$$z_4 = \frac{\pm(z_3x_a)}{\|z_3x_a\|} \quad (3.17)$$

b) La articulación 5 alineará el eje de movimiento de la articulación 6 con el vector de aproximación.

$$a = z_5 \quad (3.18)$$

c) Fijar la articulación 6 para alinear el vector de orientación dado (s) (o el de deslizamiento (n)) y el vector normal.

$$s = y_6 \quad (3.19)$$

Articulación 4

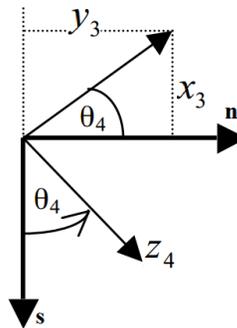


Figura 71 Esquema de la articulación 4 robot

$$\sin(\theta_4) = -M(z_4 \cdot x_3)$$

$$\cos(\theta_4) = M(z_4 \cdot y_3)$$

$$\tan(\theta_4) = \frac{M(z_4 \cdot x_3)}{M(z_4 \cdot y_3)}$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{M(z_4 \cdot x_3)}{M(z_4 \cdot y_3)} \right) \quad (3.20)$$

Articulación 5

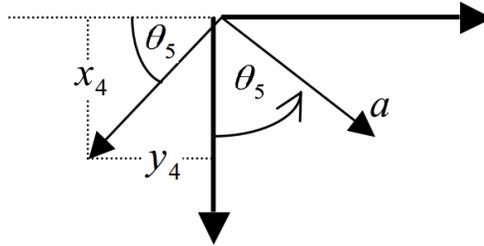


Figura 72 Esquema de la articulación 5 robot

$$\sin(\theta_5) = a \cdot x_4$$

$$\cos(\theta_5) = -a \cdot y_4$$

$$\tan(\theta_5) = \frac{a \cdot x_4}{-a \cdot y_4}$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot x_4}{-a \cdot y_4} \right) \quad (3.21)$$

Articulación 6

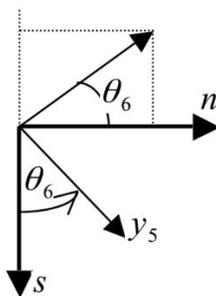


Figura 73 Esquema de la articulación 6 robot

$$\sin(\theta_6) = n \cdot y_5$$

$$\cos(\theta_6) = s \cdot y_5$$

$$\tan(\theta_6) = \frac{n \cdot y_5}{s \cdot y_5}$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot x_4}{-a \cdot y_4} \right) \quad (3.22)$$

Tabla 37

Resumen de fórmulas de ángulos de cada articulación del robot

N° de articulación	Ángulo de Articulación	Fórmula
1	θ_1	$\theta_1 = \text{atan}^{-1} \left(\frac{P_x}{P_y} \right)$
2	θ_2	$\theta_2 = \alpha + \beta$ $\theta_2 = \alpha - \beta$ $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{l_1 - p_z}{r} \right)$ $\beta = \cos^{-1} \left(\frac{l_3^2 - r^2 - l_2^2}{-2rl_2} \right)$

CONTINÚA

3	θ_3	$\theta_3 = \frac{3\pi}{2} - \beta$ $\theta_3 = \beta - \frac{\pi}{2}$
4	θ_4	$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{M(z_4 \cdot x_3)}{M(z_4 \cdot y_3)} \right)$
5	θ_5	$\theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot x_4}{-a \cdot y_4} \right)$
6	θ_6	$\theta_6 = \tan^{-1} \left(\frac{a \cdot x_4}{-a \cdot y_4} \right)$

3.8.3. Algoritmo de control

Una vez obtenidos las ecuaciones de posicionamiento en el literal anterior procedemos a desarrollar el algoritmo, el cual consiste en obtener los parámetros x, y, z y convertirlos a ángulos mediante el algoritmo de Denavith Hatenberg

En la implementación del algoritmo se utiliza el lenguaje de programación Python, utilizando la librería numpy, rospy.

Se requiere que el proceso de búsqueda de objeto, manifieste la posición del mismo, mientras se encuentre dentro del rango visual de la Kinect. Una vez conseguido los parámetros requeridos se envía la posición del objeto, para ser convertidas en ángulos cuyos valores serán los accionen los correspondientes servomotores pertenecientes a cada articulación del robot recolector de objetos.

El algoritmo se ejecuta inicialmente utilizando las funciones requeridas tomadas directamente de las librerías Freenect, cv2, numpy, rospy. Entonces se crean 3 funciones adicionales que se

trabajan en paralelamente, comunicándose constantemente con el objetivo de compartir variables necesarias para la correcta ejecución de las acciones del sistema. Como primera función se desarrolla el algoritmo reconocimiento de objetos, el cual al reconocer un objeto guarda en variables los valores del centroide x, z , entonces activa la siguiente función a través de un nodo de comunicación en el entorno ROS.

La segunda función contiene el algoritmo de Denavit Hateberg para resolver la cinemática inversa del robot de grados de libertad. En arreglo inicialmente definido como vacío se almacena los datos del centroide de la pieza detectada, obtenidos por los sensores de Kinect.

La matriz T obtenida en el subsistema del Posicionamiento del Robot donde quedan como variables la columna perteneciente a la Px, Py, Pz que son ocupadas por los valores del centroide del objeto.

Entonces se calcula en un orden específico los ángulos q_1, q_2 y q_3 utilizando las ecuaciones correspondientes, entonces se realiza el desacoplamiento cinemático y se utiliza el algoritmo de Denavit-Hartenberg para calcular los ángulos q_4, q_5, q_6 usando las matrices a, s, n generadas en el cálculo de los tres primeros ángulos.

Esta función se repite un número de veces establecido al inicio ya que se tomarán puntos para la interpolación de la trayectoria que el robot usara para llegar a la posición objetivo.

La tercera función se encarga del posicionamiento del robot, es entonces cuando se envía a través de un nodo de comunicación en el entorno ROS al serial de la tarjeta de control los valores de los ángulos a los que debe llegar cada articulación hasta cumplir el objetivo que es llegar a la posición del objeto.

Una vez que el robot se encuentre en la posición del objeto se activa el servo correspondiente al cierre de la pinza, para poder manipularlo y cambiarlo de posición fuera del rango de la Kinect, una vez que se ha llegado a ese punto externo se invierte el giro de servo del efector final para dejar el objeto.

En la Figura 74 se puede ver el diagrama del algoritmo del posicionamiento del robot.

Cabe destacar que las funciones contienen tópicos o mensajes que, al ser requeridos por el nodo, que lo necesite este puede ser enviado para el diseño del algoritmo se envían strings o cadena de caracteres, ya que en muchos casos los decimales se perdían en el transcurso de la comunicación, sin embargo, el principal limitante fue la necesidad de enviar números enteros que requerían tener un signo para ser válidos.

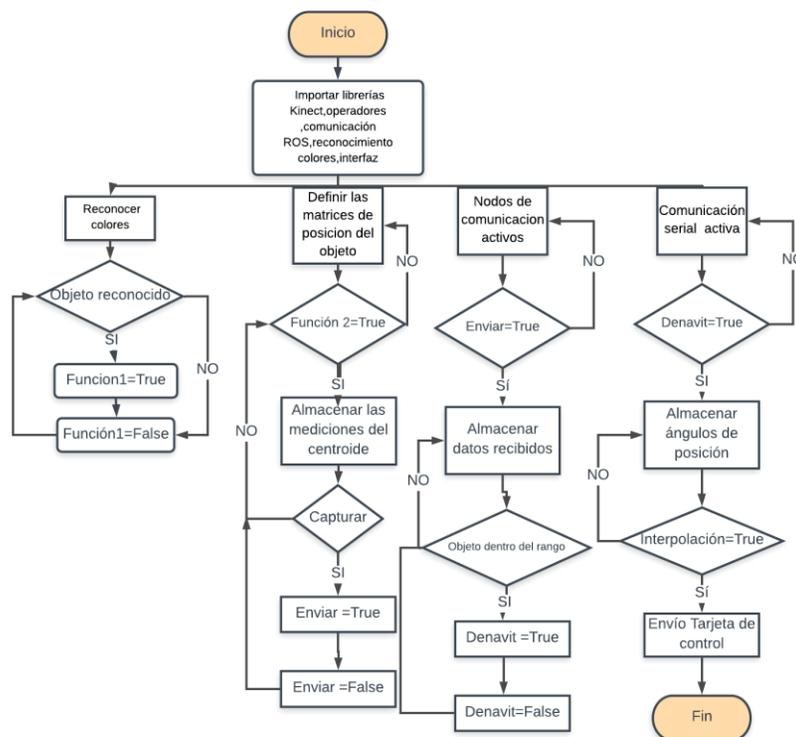


Figura 74 Algoritmo de posicionamiento del robot recolector de objetos

3.9. Subsistema 6. Sistema Interfaz Humano-Máquina (HMI)

La Interfaz gráfica permite al usuario encender /detener al sistema de recolección de objetos, visualizar el reconocimiento de objetos por los correspondientes colores, posibilitar que el usuario permita recolectar al objetivo visualizado. Adicionalmente como el sistema trabaja bajo una plataforma de software libre para la visión artificial y el cálculo de posicionamiento, es recomendable que la interfaz sea compatible o a su vez desarrollada con Python. Por estas razones se plantean Opciones de software para el desarrollo de la HMI como se describe en la Tabla 38.

Tabla 38

Selección de editor de interfaz gráfica

Solución	Símbolo	Características
Qt Designer		<ul style="list-style-type: none"> -Código abierto -Gratuito -Multiplataforma -Facilidad de uso -Compatible con Python
TKinter		<ul style="list-style-type: none"> -Código abierto y amplia difusión -Herramientas de desarrollo visual -Gratuito -Multiplataforma -Incluido origen en Python
Tango Control System		<ul style="list-style-type: none"> -Código abierto -Licencia gratuita -Programación orientada a objeto

Elegimos la opción de Tkinter ya que bien preinstalada con Python y es relativamente sencilla la creación de ventanas, limitándonos a la guía Gedis propuesta para este subsistema.

3.9.1. Ordenamiento de elementos del HMI

De acuerdo a la guía GEDIS es recomendable realizar un boceto de distribución de objetos presentes en la interfaz gráfica, de manera que sea intuitiva para el usuario, con estas recomendaciones se realiza el boceto del HMI de la ventana principal y la subsiguiente ver Figura 75.

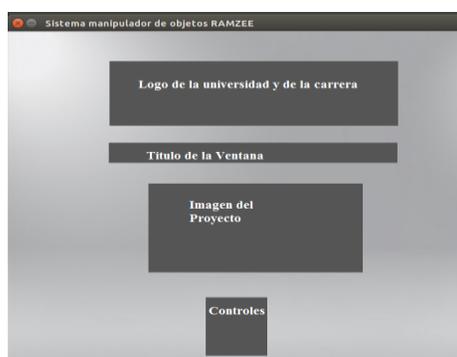


Figura 75 Boceto de distribución del HMI

3.9.2. Arquitectura y funcionamiento

En la Tabla 39 se indica el funcionamiento del HMI a detalle en cada ventana:

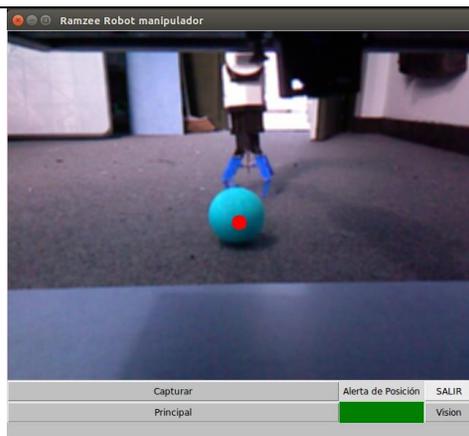
Tabla 39

Arquitectura y funcionamiento del HMI

Arquitectura	Ventana	Funcionamiento
Nivel Área: Pantalla inicial		En la ventana inicial del sistema, permite mostrar la pantalla de proceso y control y salir del sistema

CONTINÚA

**Nivel Subárea:
Ventana de
Proceso y
control**



En la ventana de control nos permite:

- Mostrar la pantalla de visión artificial.
- Capturar el objeto encontrado
- Muestra una alerta cuando el objeto se encuentra fuera de posición

3.10. Concepto Final

Como concepto final (ver Figura 76) se propone un brazo robótico de 6 grados de libertad, montado sobre una base metálica que emula las dimensiones de la plataforma robótica de exteriores GOREX. En la estructura se coloca la caja de control que cuenta con un pulsador que permite el control encendido/apagado de suministro de energía.

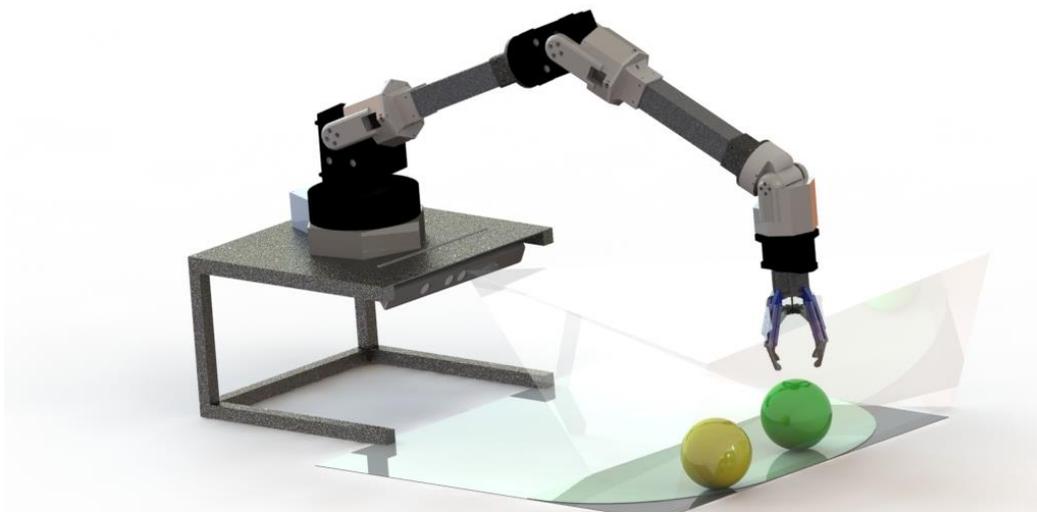


Figura 76 Concepto final del robot recolector de muestras

RESUMEN

En el capítulo se obtiene las necesidades del usuario para luego definir los argumentos técnicos que ayudan en el alcance de objetivos que son las necesidades del usuario. Los parámetros necesarios para diseño del concepto: Contar con una adecuada selección de materiales y tipo de estructura para cumplir los 6 grados de libertad requeridos, sistema de reconocimiento de objetos para su posterior manipulación entre otros.

Para cumplir con los requerimientos técnicos se requiere dividir al concepto en subsistemas que nos permitan diferenciarlo por funciones específicas que al fusionarlas se complementen de forma sinérgica para el adecuado funcionamiento del sistema de recolección de objetos. Para el proyecto se desarrollan los subsistemas: 1) Estructura del robot manipulador. 2) Sistema de Potencia, 3) Sistema de Control 4) Algoritmo de Posicionamiento del robot. 5) Sistema de Visión Artificial 6) Interfaz Humano-Máquina

Se plantea las soluciones acordes a los subsistemas establecidos con anterioridad en donde para encontrar la mejor forma que se adapte al subsistema correspondiente, se utiliza la matriz de priorización.

De manera consecuente se diseña la estructura de tal manera que se cumpla con un parámetro de modularidad, que nos permita disminuir tiempo de ensamblaje y el diseño geométrico en general. Además del tipo de bastidor que se consigue con el cálculo de volcamiento.

Posteriormente se calcula los torques que actúan en cada articulación que permita el dimensionamiento de los motores correspondientes, tomado especial consideración la dinámica del en las tres primeras articulaciones.

Para la elección de la tarjeta de control se considera el costo y la disponibilidad. Se selecciona la forma de comunicación entre la tarjeta de control y el computador de manera que sea lo más confiable y directa posible

En el subsistema de Algoritmo de Posicionamiento del robot se realiza la cinemática inversa aplicando el algoritmo de Denavith Hatenberg y el desacople cinemático para obtener las ecuaciones de ángulos correspondientes a cada articulación, los cuales se relacionan con la posición x, y, z del efector final del robot manipulador.

En el subsistema de Visión Artificial se realiza el algoritmo para la detección de 2 colores que son verde y amarillo, realizando los filtros necesarios para reducir al máximo el ruido, lo cual impide que al sistema le afecte hasta cierto grado las condiciones de luminosidad.

En el subsistema Interfaz Humano-Máquina se consideran las recomendaciones de la guía Gedis para la distribución de elementos que permitan el control intuitivo por parte del usuario.

Capítulo 4

4.1. Construcción e Implementación

El capítulo detalla el ensamblaje de las distintas partes del robot manipulador, la construcción de partes diseñadas en el capítulo anterior. Posteriormente se realizan las pruebas de funcionamiento, analizando distintos parámetros para comprobar la eficacia del sistema completo.

4.2. Construcción y ensamble del robot manipulador

4.2.1. Construcción de la base

Con el diseño propuesto se inicia soldando los perfiles correspondientes Figura 77



Figura 77 Soldado de los perfiles para conformar la estructura base

Se asegura el ángulo superior para evitar la flexión constante que se producirá en las pruebas

Figura 78



Figura 78 Colocación de ángulo de refuerzo

Se realiza los respectivos agujeros que permiten fijar la base del bastidor del robot manipulador y pintar la estructura Figura 79.



Figura 79 Preparación de la base antes de montar el robot

4.2.2. Construcción y ensamblaje del bastidor del robot manipulador

Las piezas se imprimen con PLA, sin embargo, en base a pruebas de resistencia y análisis del material en simulaciones mostradas, aquellos eslabones de la parte inferior del robot se imprimen a un porcentaje de relleno superior (80%). Para los cual se genera el código G para imprimirlas a continuación Figura 80.

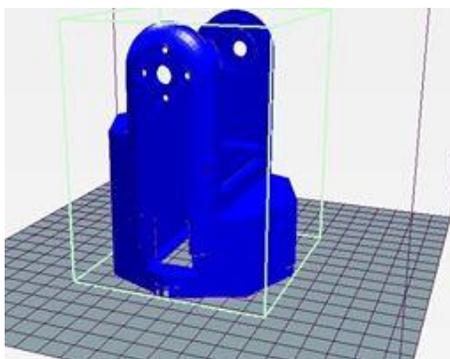


Figura 80 Pieza generada el código G para imprimirla en 3D

Se imprimen las piezas en la impresora 3D PRUSA I4 Figura 81

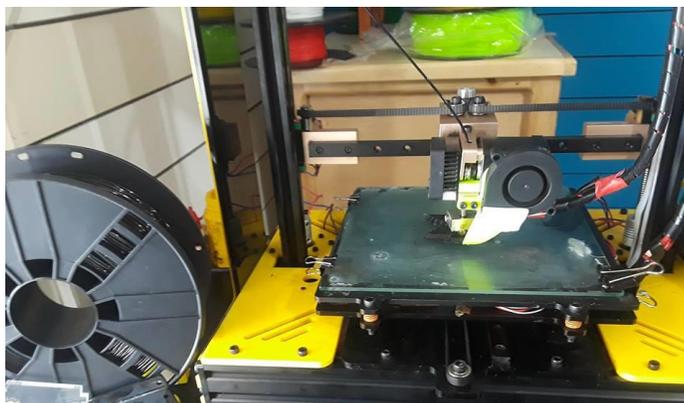


Figura 81 Impresión de la pieza base en impresora 3D

Una vez impresa las piezas se procede a identificarlas para su ensamble Figura 82



Figura 82 Identificación de piezas

Se verifica que los elementos como motores se acoplen de la mejor manera en las piezas impresas Figura 71



Figura 83 Probar que los motores encajen perfectamente

Se maquinan los acoples que corresponden a los ejes especialmente a los motores de la base

Figura 84



Figura 84 Maquinado de los acoples de los motores de la base ASMC03B

Se trabaja en el eje de los motores pues sus dimensiones dificultan el montaje de los acoples de las formas más simple posible Figura 85



Figura 85 Reducción de eje del motor ASMC03B para el acople

Para los eslabones más largos se utiliza perfiles cuadrados de aluminio Figura 86 lo que reduce el costo de impresión 3D de ser tan ligero, pero aún más resistente que la impresión.



Figura 86 Perfil de aluminio como eslabón

Una vez ensamblado las articulaciones unimos las partes para obtener el brazo completo Figura 87.



Figura 87 Construcción del brazo completo

Se construye el manipulador de 4 dedos con piezas hechas en corte láser Figura 88



Figura 88 Manipulador realizado en corte láser

4.2.2.1. Acoplamiento brazo-Base

Para acoplar a la base el brazo se utilizan chumaceras UCF204 Figura 89 colocadas con un eje de tal forma que soporten las fuerzas radiales del brazo.



Figura 89 Chumaceras UCF204 empernadas

Para finalmente se coloca el brazo completamente ensamblando con una placa en su base para fijarla Figura 90 sobre el sistema de chumaceras descrito anteriormente.

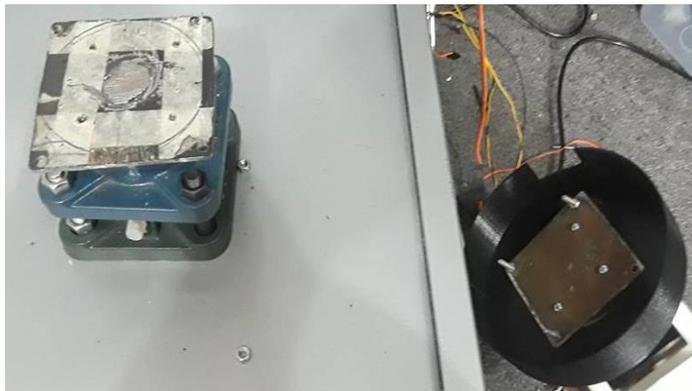


Figura 90 Fijación del brazo manipulador a la base metálica

4.3. Implementación del sistema de Visión Artificial

Se usa el sensor Kinect de la consola Xbox 360 Figura 91 Dispositivo Kinect 360, el cual tiene las limitaciones de la Tabla 40



Figura 91 Dispositivo Kinect 360

Tabla 40

Limitaciones del dispositivo Kinect

Característica	Valor o Rango
Campo de visión	57.5° horizontal x 43.5° vertical
Profundidad	0.8->4m
Secuencia de color	YUV 15 cps
Infrarrojo	No
Registro	Color - profundidad
Captura de audio	4 micrófonos proveen 48 Hz de audio
Data path	USB 2.0
Latencia	~90 ms con procesamiento
Motor de inclinación	Solamente vertical

Se usan soportes impresos en 3D en el posicionamiento del sensor Kinect a una altura y ángulo estable para evitar la pérdida de precisión en las mediciones ver Figura 92.



Figura 92 Colocación del sensor Kinect

Iluminación

Al realizar el algoritmo se realizan varios filtros que nos permiten evitar ruidos en las mediciones, sin embargo, las condiciones de luz no pueden bajar, ya que el sistema pierde la precisión especialmente en la medición de la profundidad.

Objetos

Los objetos utilizados en las pruebas son esferas hechas de espuma de poliuretano pintadas de verde y amarillo Figura 93 las que evitan el daño del manipulador, en el caso de que este último se acercara demasiado al punto de recolección.



Figura 93 Esferas de espuma de poliuretano verde y amarilla

4.3.1. Calibración del dispositivo Kinect y obtención de las coordenadas xz y la profundidad

Para calibrar la profundidad y coordenadas xz se utiliza el software rtabmap que es de acceso libre el cual tiene una librería para Kinect llamada Find Object.

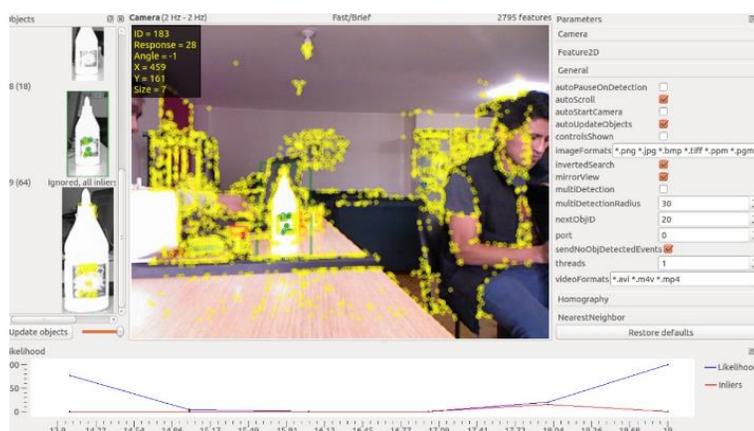


Figura 94 Calibración de Kinect con RTABMAP

Entonces con un propio algoritmo basado en el reconocimiento de colores de OpenCV y la librería Freenect, se obtiene los resultados Figura 95

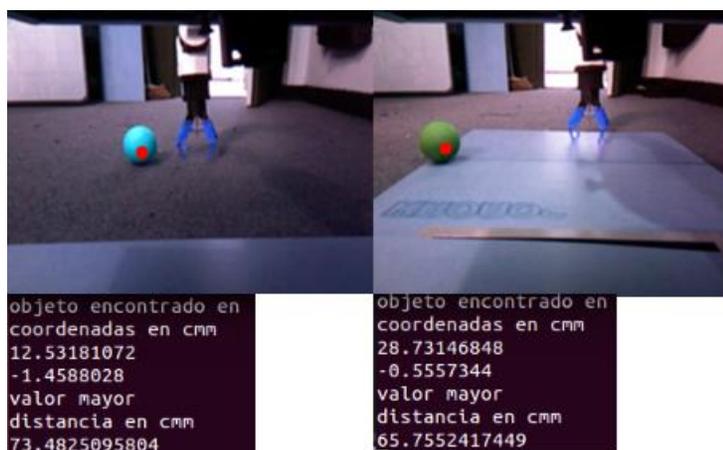


Figura 95 Pruebas de reconocimiento de objetos y su posición

En la calibración también se prueba la posibilidad de reconocimiento de formas Figura 96 pero debido al costo computacional que este algoritmo implicaba, además del ruido, se decide limitar el reconocimiento de objetos por el de colores.

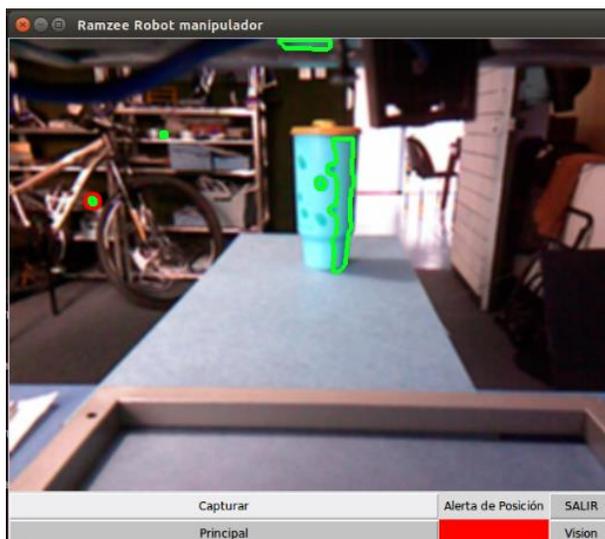


Figura 96 Prueba de reconocimiento de formas

4.4. Pruebas y resultados

El propósito de realizar las pruebas es evidenciar las limitaciones del robot en condiciones reales ya sea de repetibilidad, capacidad de carga, precisión. Además de la verificación del área de trabajo propuesta para el robot manipulador.

4.4.1. Capacidad máxima del brazo robótico al levantar objetos

En el libro de robótica la capacidad de carga es el peso en kilogramo que puede transportar el robot de una posición a otra. (Wolf, Steinman, & Schunck, 2005)

Se prueba la robot aumentando la carga en 100 *gr* en cada prueba hasta llegar al propuesto que es 0.5 *kg* a una altura vertical variable desde 50*cm* , del cual se obtiene el resultado sobre la capacidad de carga, tomando en cuenta las posiciones críticas en las que el robot puede trabajar, cuyos resultados se muestran en la Tabla 41

Tabla 41*Pruebas de capacidad de carga del robot manipulador*

Peso (kg)	Distancia (cm)	Cumple	Demostración
0.1	70	SI	Anexo 14 (a)
0.2	60	SI	Anexo 14 (b)
0.3	50	SI	Anexo 14 (c)
0.4	70	SI	Anexo 14 (d)
0.5	65	SI	Anexo 14 (e)
0.6	60	NO	Anexo 14 (f)

En los resultados se puede apreciar que el robot es capaz de levantar la carga propuesta que es 0,5 kg sin embargo la capacidad de la estructura puede superar varias veces este valor, con la única limitante que es el efector final, pues este no tiene el torque suficiente para presionar al objeto y mantenerlo en el movimiento del brazo manipulador.

4.4.2. Repetitividad

El robot fue programado para tener la capacidad de hacer acciones repetitivas sin perder la posición final en cada intento, lo cual es muy importante en la recolección de objetos, para esto con las pruebas siguiente se realiza 4 intentos de llegar a la misma posición y los resultados se ven en la Tabla 42

Tabla 42*Tabla de repetitividad*

Objetivo(cm)	Intento	Tiempo (s)	Variación del punto dado (mm)	Demostración
Punto 1	1	6	0	Anexo 15 (a)
	2	6	1	Anexo 15 (b)
	3	6	2	Anexo 15 (c)
	4	6	1	Anexo 15 (d)
Punto 2	1	7	0	Anexo 16 (a)
	2	7	1	Anexo 16 (b)
	3	7	2	Anexo 16 (c)
	4	7	1	Anexo 16 (d)

Tabla 43*Tabla de errores en la repetitividad punto 1*

Intento	Valor esperado (cm)	Valor medido (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
1	40	40	0	0,00
2	40	40,1	0,1	0,25
3	40	40,2	0,2	0,50
4	40	40,1	0,1	0,25

Tabla 44*Tabla de errores en la repetitividad punto 2*

Intento	Valor esperado (cm)	Valor medido (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
1	40	40	0	0,00
2	40	40,2	0,2	0,50
3	40	40,2	0,2	0,50
4	40	40,3	0,3	0,74

Una vez realizada las pruebas Tabla 42 se considera que el error repetitividad del robot es menor al 1%, se considera que el robot pueda realizar la misma acción varias veces sin variar la posición del efector final

4.4.3. Precisión de visión artificial del sensor Kinect

El Kinect se encuentra a una distancia de 85 cm del punto de alcance máximo del brazo manipulador, se realizan las pruebas en los puntos extremos del área de trabajo.

Tabla 45*Pruebas de visión artificial utilizando objeto amarillo*

Objetivo(cm)	Tiempo de estabilización de sensor (s)	de Variación del punto dado (cm)	Demostración
x=5 y=57 z=-25	1	0,2	Anexo 17
x=5 y=41 z=-25	2	0,1	Anexo 18
x=29 y=65 z=-25	3	1	Anexo 19
x=-16 y=63 z=-25	2	0,7	Anexo 20
x=-12 y=40 z=-25	3	0,4	Anexo 21

Tabla 46*Errores en pruebas de visión artificial utilizando objeto amarillo*

Posición z=-25	Valor Kinect x (cm)	Valor medido en x (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)	Valor Kinect y (cm)	Valor medido en y (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
x=5 y=57	5	5,2	0,2	3,85	57	58	1	1,72
x=5 y=41	5	4,9	-0,1	-2,04	41	39,5	-1,5	-3,80
x=29 y=65	29	28	-1	-3,57	65	62,5	-2,5	-4,00
x=-16 y=63	-16	-15,3	0,7	-4,58	63	61,6	-1,4	-2,27
x=-12 y=40	-12	-12,4	-0,4	3,23	40	42	2	4,76

Tabla 47*Pruebas de visión artificial utilizando objeto verde*

Objetivo(cm)	Tiempo (s)	Variación del punto dado (mm)	Demostración
x=5 y=64 z=-25	1	10	Anexo 22
x=7 y=43 z=-25	2	4	Anexo 23
x=29 y=65 z=-25	3	13	Anexo 24
x=-15 y=64 z=-25	2	11	Anexo 25
x=-14 y=40 z=-25	2	14	Anexo 26

Tabla 48*Errores en pruebas de visión artificial utilizando objeto verde*

Posición z=-25	Valor Kinect x (cm)	Valor medido en x (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)	Valor Kinect y (cm)	Valor medido en y (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
x=5 y=64	5	4,9	-0,1	-2,04	57	58	1	1,72
x=7 y=43	7	6,7	-0,3	-4,48	41	39,5	-1,5	-3,80
x=29 y=65	29	27,8	-1,2	-4,32	65	62,5	-2,5	-4,00
x=-15 y=64	-15	-15,8	-0,8	5,06	64	61,6	-2,4	-3,90
x=-14 y=40	-14	-15,2	-1,2	7,89	40	41	1	2,44

En ambos colores no se supera el error de precisión del 5% lo quiere decir que el robot que la precisión del sensor Kinect es aceptable.

4.4.4. Precisión al llegar a la posición dentro del área de trabajo

En la recolección de objetos es importante la precisión del robot de llegar al robot al punto dado, ya que de esta manera puede manipularlo y llevarlo a otra posición. Para esta prueba utilizamos la visión artificial, se comprueba el algoritmo de ir a la posición indicada y tomar el objeto ver Tabla 49 y Tabla 51

Tabla 49*Recolección de objeto amarillo*

Objetivo(cm)	Tiempo (s)	Variación del punto dado (mm)	Demostración
x=5 y=64 z=-25	40	12	Anexo 27
x=29 y=64 z=-25	43	10	Anexo 28
x=16 y=40 z=-25	44	17	Anexo 29
x=-19 y=63 z=-25	45	14	Anexo 30
x=-14 y=52 z=-25	42	15	Anexo 31
x=16 y=53 z=-25	41	16	Anexo 32

Tabla 50*Errores en pruebas de posicionamiento utilizando objeto amarillo*

Posición z=-25	Valor Kinect x (cm)	Valor medido en x (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)	Valor Kinect y (cm)	Valor medido en y (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
x=5 y=64	5	5,1	0,1	1,96	64	62	-2	-3,23
x=29 y=64	29	28	-1	-3,57	64	65	1	1,54
x=16 y=40	16	17,5	1,5	8,57	40	43	3	6,98
x=-19 y=63	-19	-19,5	-0,5	2,56	63	61,5	-1,5	-2,44
x=-14 y=52	-14	-14,5	-0,5	3,45	52	53,5	1,5	2,80

Tabla 51*Recolección de objeto verde*

Objetivo(cm)	Tiempo (s)	Variación del punto dado (mm)	Demostración
x=5 y=62 z=-25	41	17	Anexo 33
x=5 y=40 z=-25	42	4	Anexo 34
x=28 y=62 z=-25	45	15	Anexo 35
x=16 y=41 z=-25	45	11	Anexo 36
x=-19 y=64 z=-25	41	14	Anexo 37
x=-16 y=40 z=-25	40	16	Anexo 38

Tabla 52*Errores en pruebas de posicionamiento utilizando objeto verde*

Posición	Valor Kinect x (cm)	Valor medido en x (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)	Valor Kinect y (cm)	Valor medido en y (cm)	Error Absoluto	Error relativo (%)
x=5 y=40 z=-25	5	5,2	0,2	3,85	62	64	2	3,13
x=28 y=62 z=-25	5	5,8	0,8	13,79	40	40,6	0,6	1,48
x=16 y=41 z=-25	28	29,2	1,2	4,11	62	64,5	2,5	3,88
x=-19 y=64 z=-25	16	17	1	5,88	41	41,5	0,5	1,20
x=-16 y=40 z=-25	-19	-18,6	0,4	-2,15	64	62	-2	-3,23

Con los resultados obtenidos en las Tabla 50 y Tabla 51 se puede apreciar que los errores en la presión son mayores mientras menor es la distancia, esto sucede porque el dispositivo Kinect pierde la precisión al disminuir la distancia de medición por lo tanto los errores se propagan y la precisión en el posicionamiento del robot no es la óptima en aquella zona de trabajo , además de tener ciertos errores en los mecanismo al tratarse de un prototipo. Sin embargo, no afecta la recolección de las muestras propuestas al tener una pinza de una abertura máxima de 10cm

4.5. Alcances y Limitaciones

- El robot manipulador de objetos cuenta con 6 grados de libertad que facilita de gran manera el alcance de objetos bajo su nivel de referencia y sobre este en diferentes posiciones de su efector final.
- Una de las características del efector final construido es la capacidad de tomar objetos de hasta 0,5 kg, de diferentes texturas lo que facilita su manipulación.
- El robot tiene un peso total de 6,5 kg sin tomar en cuenta la base estructural que emula las dimensiones de la plataforma móvil de exteriores donde se planifica su acoplamiento.
- EL robot manipulador funciona bajo los parámetros requeridos por el usuario apropiado para el control y recolección de objetos por colores amarillo y verde.
- Por la interpolación realizada para su posicionamiento el robot tiende a disminuir la velocidad por ende le toma más tiempo llegar a recoger el objeto, pero se compensa en la correcta manipulación de este último.

4.6. Resumen

La construcción del robot manipulador de objetos se construye en varias etapas en donde primero se ensambla su base de acuerdo al diseño planteado, se realizó las pruebas de rigidez para la carga sobredimensionada del brazo robótico.

Luego se imprimen en 3D los diferentes acoples de las articulaciones del robot de 6 grados de libertad y se cortan los eslabones de las dimensiones acorde al diseño del brazo robótico.

Una vez diseñados los acoples estos se maquinan para los motores correspondientes al hombro y codo del robot, ya que en los demás casos los motores contienen un kit de acoples estándares.

Se realiza el corte láser de las piezas que conforman el manipulador del robot, cuyo funcionamiento es con el avance o retroceso de un tornillo acoplado al motor de rotación continua.

Se acopla todo el robot a la base con chumaceras en serie para soportar la mayor parte de cargas radiales sobre el eje motriz de la base del robot manipulador.

Se coloca el sensor Kinect en la posición posterior a la base del robot manipulador lo que permite obtener la distancia mínima de detección de profundidad para calcular la posición del objeto.

Se calibra al sensor Kinect con RTABMAP para obtener la posición y profundidad en la que se encuentra el objeto con respecto al sensor.

Se realizan varias pruebas en el robot para verificar que su precisión, repetitividad, capacidad de carga estén acorde a las necesidades planteadas por el usuario.

Por último, se prueba el algoritmo creado para la recolección de objeto que permite posicionar al robot de acuerdo a la ubicación medida con el sensor Kinect

Capítulo 5

5.1. Conclusiones, recomendaciones y trabajos

5.1.1. Conclusiones

- La investigación permitió el desarrollo de un sistema de recolección de objetos para la integración de la plataforma robótica de exteriores perteneciente al Laboratorio de Manufactura del DECEM.
- Se diseñó y construyó un robot antropomórfico de 6 grados de libertad que posibilita la recolección de muestras en un área de trabajo localizada bajo el nivel de referencia de su base.
- La ejecución del algoritmo de visión artificial facilita el reconocimiento de la posición x, y, z mediante la percepción de colores específicos tales como amarillo y verde siempre que el medio cumpla con las condiciones de luminosidad externas, fijando así los parámetros para el adecuado posicionamiento del robot manipulador.
- Los cálculos efectuados con el algoritmo de posicionamiento proporcionan al sistema embebido la facultad de ubicar al efector final del robot manipulador en la posición obtenida del sistema de visión artificial.
- La aplicación de las pruebas como resultado que: la repetitividad del 80%, su error de posicionamiento es de 2% y su capacidad de carga es de máximo 0,5 kg mismos que cumplen con el requerimiento planteado por el usuario.

5.1.2. Recomendaciones:

- Para un funcionamiento más eficiente de la recolección de objetos se recomienda utilizar iluminación adecuada ya que en condiciones de baja luminosidad se pierde la precisión en el reconocimiento de la posición del objeto.

- Se recomienda habilitar primero la aplicación de interfaz gráfica antes de encender la fuente principal del robot, para evitar cualquier daño por el reinicio del microcontrolador al cargar por primera vez.
- Debido a las limitaciones del alcance del robot manipulador limitada por el área de trabajo evitar el control manual del mismo, ya que se corre el riesgo de dañar las partes mecánicas, limitadas en el algoritmo, al no poseer sensores de posicionamiento.

5.1.3. Trabajos futuros

- Una de las mejoras es la integración del robot manipulador a la plataforma móvil de exteriores que permita la movilización del manipulador y cumpla con la recolección de objetos en ambientes industriales reales.
- Diseñar un Gripper universal que permita manipular objetos de manera eficiente, lo que reduciría el tiempo de recolección de objetos y aumentaría la eficacia del sistema propuesto.
- Desarrollar un algoritmo para el reconocimiento de objetos por formas y colores con base de datos de objetos reconocidos lo que aumentará la versatilidad del sistema en su aplicación.

Bibliografía

- Alhwarin, F. (2013). *Improving depth images by combining structured light with IR stereo*. Aachen: University of Applied of Sciences.
- Arlington, D. (2016, Mayo 12). *Defense advanced research projects agency*. Retrieved from <http://www.darpa.mil/>
- Barón Solans, A. (2017). *Sistema de adquisición de datos portátil para la generación de nubes de puntos 3D georreferenciadas a partir de un sensor Lidar 2d, una unidad de medida inercial y un receptor Gnss-Rtk*. Portugal: Universidad de Lleida.
- Berger, K. (2014). A state of the art report on multiple RGB-D sensor research and on publicly available RGB-D datasets. *Springer International Publishing* (pp. 36-55). Switzerland: Springer International Publishing.
- Budynas , R., & Nisbet, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- Buter, M. (2016, Agosto 1). *Ultimaker, 2.8*. (Optalia, Editor) Retrieved Septiembre 12, 2017, from Cajas de plástico para la electrónica:
<https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf>
- Cedal. (2016, Mayo 18). *Corporación ecuatoriana CORPESA*. Retrieved from <http://www.cedal.com.ec/categorias/perfiles-de-aluminio/tubos/cuadrado/tubos-cuadrados.html>
- Chavaliers, P. (2015, Enero 29). *Tecdron robotic system*. Retrieved from <http://www.tecdron.fr/en/fireextinguishing-operation-sdis-17>
- Chw, C. (2013, Junio 20). *Robot desactivador de bombas*. Retrieved from <http://www.chw.net/2013/06/militares-disenan-robot-desactivador-debombas-con-manos-de-apariencia-humana>

- Cóndor Zapata, A. F., & Martínez Herrera, P. D. (2017, Febrero 12). *Repositorio ESPE*. Retrieved from <https://repositorio.espe.edu.ec/>
- Dunbar, B. (2017). *National aeronautics and space administration*. Retrieved Junio 21, 2017, from <https://www.nasa.gov/>
- Ferre, M., Aracil, R., & Sanchez Uran, M. A. (2008). *Stereoscopic human interfaces - Advanced telerobotic applications for telemanipulation*. IEEE Robotics & Automation Magazine.
- Ficalora, J. P., & Cohen, L. (2009). *Quality function deployment , a QFD handbook*. Indiana: Prentice Hall.
- Garzón Jaramillo, P. M., & Obando Maldonado , C. A. (2016, Junio 23). *Repositorio ESPE*. Retrieved from https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/1?subject_page=2
- Izadi, M. (2011). *Real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera*. Mexico: Microsoft Research Cambridge.
- Kelly, R., & Santibañez, V. (2008). *Control de movimiento de robot manipuladores*. Mexico: Prentice Hall.
- Lai, K. (2010). *A large-scale hierarchical multi-view RGB-D*. Taiwan: Object Dataset.
- Leon Vasquez, I. A., & Vasquez Tapia, A. J. (2013). *Diseño e implementación de un robot autónomo y teleoperado para labores agrícolas*. Sangolquí.
- Liu, X., & Hen, Y. (2005, Septiembre). An active volumetric model for 3d reconstruction. In image processing. *ICIP 2005. Vol 2*, pp. II-101. IEEE International Conference.
- Makhal, A. (2015). *Comparison and evaluation of common hands with self-designed task-specific robotic hands in context of grasp*. Pocatello, Idaho: Robotics.
- Microsoft. (2017). *Microsoft*. Retrieved from <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>
- Mott, R. L. (2010). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education.
- Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Marcombo S.A.

- Phunopas, A. (2016, Marzo). *Description paper iRAP robot*. Retrieved from Tdp Collection:
http://www.robocup2016.org/media/symposium/Team-Description-Papers/RescueRobot/RoboCup_2016_Rescue_tp_Irap.pdf
- Rod, F. (2014). *Montaje y puesta en marcha de sistemas robóticos y sistemas de visión*. Mexico: IC Editorial.
- Romeo Ortega, A. L. (1998). *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems*. London: Springer.
- Sanz, P. (2011). *Universidad Carlos III de Madrid- Departamento de Mecánica*. Retrieved Febrero 29, 2016, from http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11759/PFC_Pablo_Hernando_Sanz.pdf?sequence=1
- ServoDatabase Servo Specifications and Review*, 1.9. (2009, Mayo 12). Retrieved Septiembre 12, 2017, from <https://servodatabase.com/servo/hitec/hs-m7990th>
- Technology, C. I. (2012, Noviembre). *Jet propulsión laboratory*. Retrieved from <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>
- Vilanova , G. (2015, Junio 10). *Bove-Ag Plásticos y Elastómeros S. L*. Retrieved from Bove-ag plásticos y elastómeros S. L.: http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html
- Wolf, A., Steinman, R., & Schunck, H. (2005). *Grippers in motion: The fascination of automated handling tasks*. Berlín: Springer.