



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PINZA
FLEXIBLE BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE ROBÓTICA
BLANDA PARA MANIPULACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE
OBJETOS CON GEOMETRÍA IRREGULAR IMPLEMENTADO
EN EL BRAZO ROBÓTICO MITSUBISHI DEL LABORATORIO
DE MECATRÓNICA**

AUTORES:

**XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO
JOSSBELL FABIÁN TELLO CORDONES**

DIRECTOR: ING. ANDRÉS GORDON

LATACUNGA

2017



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PINZA FLEXIBLE BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE ROBÓTICA BLANDA PARA MANIPULACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE OBJETOS CON GEOMETRÍA IRREGULAR IMPLEMENTADO EN EL BRAZO ROBÓTICO MITSUBISHI DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**” realizado por el señores **XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO** y **JOSSBELL FABIÁN TELLO CORDONES**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO** y **JOSSBELL FABIÁN TELLO CORDONES** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, septiembre del 2017

Atentamente,

Ing. Andrés Gordon
Director



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO**, con cédula de identidad N° 1804660452 y **JOSSBELL FABIÁN TELLO CORDONES**, con cédula de identidad N° 0502752264, declaramos que este trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PINZA FLEXIBLE BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE ROBÓTICA BLANDA PARA MANIPULACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE OBJETOS CON GEOMETRÍA IRREGULAR IMPLEMENTADO EN EL BRAZO ROBÓTICO MITSUBISHI DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA”** 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 nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, septiembre del 2017

Xavier Alejandro Naranjo Vallejo

C.C.: 1804660452

Jossbell Fabián Tello Cordones

C.C.: 0502752264



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO** y **JOSSBELL FABIÁN TELLO CORDONES**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución la presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PINZA FLEXIBLE BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE ROBÓTICA BLANDA PARA MANIPULACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE OBJETOS CON GEOMETRÍA IRREGULAR IMPLEMENTADO EN EL BRAZO ROBÓTICO MITSUBISHI DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, septiembre del 2017

Xavier Alejandro Naranjo Vallejo

C.C.: 1804660452

Jossbell Fabián Tello Cordones

C.C.: 0502752264

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera. A mis padres, porque ellos siempre estuvieron junto a mí brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona. A mis hermanos por su compañía y todas sus palabras de aliento, a mis abuelos quienes nunca me dejaron solo y me han apoyado en todo este transcurso. A mi compañera por sus palabras y confianza, por su amor y brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente, a mis amigos, compañeros y a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Xavier Alejandro Naranjo Vallejo

Este proyecto y en general toda mi formación profesional le dedico a mis padres, quienes siempre han estado pendiente de mi bienestar y apoyándome en cada momento durante mi carrera universitaria, por ser un gran ejemplo en el ámbito personal y profesional. A mi hermano por su compañía y todas sus palabras de aliento y a mi mascota quien siempre estuvo a mi lado acompañándome mientras estudiaba.

Josbell Fabián Tello Cordones

AGRADECIMIENTO

Culminando el presente trabajo de titulación agradecemos en primera instancia a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga la cual tras estos cinco años nos ha brindado los conocimientos necesarios para nuestro desarrollo profesional.

Por consiguiente agradecemos a nuestro tutor de tesis Ingeniero Andrés Gordon por el apoyo brindado, el tiempo y el conocimiento compartido hacia nuestro proyecto.

Sin lugar a duda agradecemos a nuestros familiares y amigos por aportar con su incondicional apoyo para culminar con éxitos este primer escalón profesional.

Xavier y Jossbell

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL).....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
PRESENTACIÓN.....	xx

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Variables e Indicadores	4
1.6 Metodología.....	4

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	5
2.1 Robótica industrial.....	5
2.2 Generaciones de los robots industriales.....	5
2.3 Elementos terminales o actuadores finales en robots industriales	7
2.4 Teoría de la robótica blanda.....	10
2.5 Actuadores en la robótica blanda	12
2.6 Control del actuador blando	17

2.7	Robot Mitsubishi RV-2SDB	18
2.7.1	Controlador (CR2-571)	19
2.7.2	Botonera de Mando (T/B)	21
2.7.3	COSIROP. Software de programación robot RV-2SDB	23
2.8	Clasificación automática de objetos	23
2.8.1	Lectura y guardado de imágenes	25
2.8.2	Capturar video webcam.....	25
2.8.3	Suavizado de imágenes	25
2.8.4	Filtro Gaussiano	26
2.8.5	Colores y espacios de color	26
2.8.6	Seguimiento de objetos	27

CAPÍTULO III

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA

	MECATRÓNICO	29
3.1	Parámetros de diseño	29
3.2	Diseño de actuadores blandos	29
3.3	Morfología de Pneu-nets	31
3.3.1	Criterios de selección de la morfología de los Pneu-net	33
3.4	Parámetros de diseño de FPN	33
3.5	Análisis de fatiga de FPN	35
3.6	Materiales de construcción de los Pneu-net.....	36
3.6.1	Criterios de selección de materiales de construcción Pneu-net	39
3.7	Diseño del actuador blando.....	39
3.7.1	Diseño de capa superior extensible	40
3.7.2	Diseño de moldes para capa superior extensible	40
3.7.3	Diseño de capa inferior flexible	41
3.7.4	Diseño del molde de la capa inferior flexible	41
3.7.5	Ensamble del actuador blando	42
3.8	Análisis dinámico del actuador blando	43
3.9	Diseño mecánico de la pinza flexible	45
3.9.1	Materiales de construcción de componentes	45
3.9.2	Criterios de selección de materiales de construcción del sujetador ..	47
3.9.3	Diseño de pieza soporte	48

3.9.4	Diseño de pieza Fijador	49
3.9.5	Diseño de pieza Inserción de aire	49
3.9.6	Ensamble del actuador y gripper	50
3.10	Análisis estático del sujetador	51
3.11	Ensamble final	53
3.12	Sistema de control del actuador blando	53
3.13	Creación del programa	56
3.14	Diseño del módulo clasificador de objetos	58
3.14.1	Criterios de selección de materiales de construcción del módulo	59
3.15	Diseño mecánico	60
3.15.1	Diseño de paleta de empuje	61
3.15.2	Diseño de plato giratorio	62
3.16	Actuadores	62
3.16.1	Alternativas de selección de actuadores	62
3.16.2	Criterios de selección de actuadores	64
3.17	Ensamble total del módulo clasificador de objetos y explicación	65
3.18	Diseño electrónico	66
3.19	Tarjeta de control	67
3.19.1	Alternativas de selección para la tarjeta de control	67
3.19.2	Criterios de selección para la tarjeta de control	69
3.20	Cámara del Sistema de Visión Artificial	69
3.20.1	Alternativas de Selección de la Cámara del Sistema de Visión Artificial	70
3.20.2	Criterios de Selección de cámara del Sistema de Visión Artificial	71
3.21	Sistema de control del módulo clasificador	72
3.22	Clasificación mediante visión artificial	72

CAPÍTULO IV

	CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	74
4.1	Proceso de impresión y piezas finales	74
4.2	Construcción de matriz para elaboración de actuadores blandos	75
4.3	Fabricación de actuadores blandos	77
4.3.1	Preparación de moldes	77
4.3.2	Preparación de material	79

4.3.3	Moldeado del actuador blando y cámara de vacío	80
4.3.4	Secado y desmolde	82
4.3.5	Sellado	83
4.4	Ensamble de pinza flexible	84
4.5	Construcción de módulo	86

CAPÍTULO V

	PRUEBAS Y RESULTADOS	93
5.1	Pruebas de funcionamiento del actuador blando	93
5.2	Pruebas de movimiento de actuador blando implementado en brazo robótico.....	95
5.3	Pruebas en el módulo clasificador de objetos	98
5.3.1	Pruebas y calibración de piezas paleta de empuje y plato giratorio..	98
5.3.2	Pruebas de clasificación de objetos mediante visión artificial	100
5.4	Pruebas de todo el sistema	102
5.4.1	Etapas de manipulación de objetos	102
5.4.2	Etapas de clasificación de objetos	103
5.5	Validación de la hipótesis	105
5.6	Análisis financiero	108

CAPÍTULO VI

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
6.1	Conclusiones	110
6.2	Recomendaciones	112

	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
--	---	------------

	ANEXOS.....	121
--	--------------------	------------

Anexo A Planos de conjunto y despiece de pinza flexible

Anexo B Planos de conjunto y despiece de modulo clasificador

Anexo C Código programación brazo robótico

Anexo D Código de sistema de control de modulo clasificador

Anexo E Código en Python detección colores HSV

Anexo F Código en Python clasificación por visión artificial

Anexo G Tabla de distribución chi-cuadrado

Anexo H Manual de usuario

Anexo I Paper

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Robot industrial KUKA	5
Figura 2 Unimate robot industrial primera generación	6
Figura 3 Robot industrial segunda generación	6
Figura 4 Robot industrial tercera generación	7
Figura 5 Robot industrial cuarta generación	7
Figura 6 Pinzas	8
Figura 7 Gripper angular	9
Figura 8 Gripper paralelo	9
Figura 9 Pulpo diseñado con robótica blanda	11
Figura 10 Corte longitudinal de actuador con dieléctrico elastomérico	12
Figura 11 Cuerpo blando con actuación radial por resortes de SMA.....	13
Figura 12 Robot blando accionado por aire comprimido.....	13
Figura 13 Actuadores flexibles de redes neumáticas.....	14
Figura 14 Pneu-nets Bending Actuators	14
Figura 15 Pinza flexible Manipulación de frutas.....	16
Figura 16 Pinza flexible Manipulación de distintos objetos	16
Figura 17 Exoesqueletos inflables	16
Figura 18 Exploración en ambientes acuáticos.....	17
Figura 19 Robot Mitsubishi R V2-2SDB.....	18
Figura 20 Partes del controlador.....	20
Figura 21 Partes de la Botonera de mando	21
Figura 22 Logos OpenCV y Python	24
Figura 23 Filtrado Gaussiano.....	26
Figura 24 Espacios de color RGB y HSV.....	27
Figura 25 Rango de colores en HSV	27
Figura 26 Seguimiento de objeto de color deseado.....	27
Figura 27 Logo PyQt.....	28
Figura 28 Logo Arduino	28
Figura 29 Representación esquemática de lenta pneu-net (SPN)	31
Figura 30 Representación esquemática de rapida pneu-net (SPN),.....	32
Figura 31 Estructura interna de FPN	34
Figura 32 Curva PV de FPN	34

Figura 33 Curvas de presión-volumen de histéresis para actuadores FPN antes y después de accionamiento neumático repetido	36
Figura 34 Elastosil M4601	37
Figura 35 Ecoflex 30	38
Figura 36 A) Capa superior extensible, B) Entradas de Capa superior extensible	40
Figura 37 Moldes para capa superior extensible	40
Figura 38 Ensemble de molde para obtención del actuador blando	41
Figura 39 Capa inferior flexible	41
Figura 40 Molde de la capa inferior flexible	42
Figura 41 A) Ubicación de capas del actuador, B) Ensemble final de actuador blando	42
Figura 42 Cámaras internas del actuador blando	43
Figura 43 Análisis dinámico de inyección del fluido en el actuador	43
Figura 44 Análisis de Von Misses	44
Figura 45 Análisis de desplazamientos.....	45
Figura 46 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	46
Figura 47 Ácido Popiláctico (PLA)	47
Figura 48 Diseño CAD de pieza soporte.....	48
Figura 49 Diseño CAD de pieza fijador.....	49
Figura 50 Diseño CAD de pieza Inserción de aire	49
Figura 51 Ensemble de actuador blando - fijador - inserción de aire	50
Figura 52 Ensemble final de gripper	50
Figura 53 Análisis del factor de seguridad	51
Figura 54 Análisis estático de la base del sujetador	51
Figura 55 Análisis del factor de seguridad	52
Figura 56 Análisis estático del sujetador.....	52
Figura 57 Ensemble final gripper - brazo robótico	53
Figura 58 Estación Robot	54
Figura 59 Válvula solenoide CPE10-M1H-5/3G-QS-4	54
Figura 60 Diagrama de flujo programación robot.....	55
Figura 61 Representación gráfica de programación de robot	57
Figura 62 Módulo clasificador por gravedad	61
Figura 63 Diseño CAD – paleta de empuje.....	61

Figura 64 Diseño CAD de plato giratorio	62
Figura 65 Servomotores DC	63
Figura 66 Motor a pasos	64
Figura 67 Ensamble total del módulo clasificador de objetos	65
Figura 68 Diagrama de flujo programación modulo clasificador	66
Figura 69 Arduino uno	67
Figura 70 Raspberry Pi 2 Modelo B	68
Figura 71 Genius FaceCam 320X.....	70
Figura 72 Cámara web LOGITECH C170.....	71
Figura 73 Conexión Arduino - servomotores.....	72
Figura 74 Interfaz clasificación mediante visión artificial.....	73
Figura 75 Proceso de impresión 3D.....	74
Figura 76 Componentes impresos	75
Figura 77 Componentes con acabado final	75
Figura 78 Proceso de impresión matriz	76
Figura 79 Matriz entrada capa superior extensible	76
Figura 80 Matriz capa superior extensible	76
Figura 81 Matriz capa inferior flexible	77
Figura 82 Lubricación molde capa inferior flexible	78
Figura 83 Lubricación molde capa superior extensible	78
Figura 84 Lubricación molde entrada capa superior extensible	78
Figura 85 Colocación de tinta	79
Figura 86 Colocación parte A y B en envase para mezclar	79
Figura 87 Mezcla de las partes	80
Figura 88 Relleno de molde capa superior extensible	80
Figura 89 Relleno de molde capa inferior flexible	81
Figura 90 Moldes en cámara de vacío.....	81
Figura 91 Eliminar burbujas	81
Figura 92 Formación de actuador blando capa superior extensible.....	82
Figura 93 Secado de material	82
Figura 94 Desmolde de actuador blando	82
Figura 95 Recorte de material extra.....	83
Figura 96 Sellado de actuadores blandos.....	83
Figura 97 Actuadores blandos finales.....	83

Figura 98 Colocación de tubería	84
Figura 99 Insertar actuador en fijador	84
Figura 100 Unión inserción de aire-fijador	85
Figura 101 Ajuste y aseguramiento de tubería	85
Figura 102 Acoplamiento de componentes al sujetador	85
Figura 103 Pinza flexible final	86
Figura 104 Acople de la pinza flexible al brazo robótico	86
Figura 105 Pinza flexible y brazo robótico	86
Figura 106 Plancha de acero laminado en frío a ser doblada y cortada	87
Figura 107 Dobles de material	87
Figura 108 Corte de material	87
Figura 109 Estructura base del módulo	88
Figura 110 Pisos para dividir el módulo	88
Figura 111 Fijación de tubería mediante soldadura	88
Figura 112 Módulo ensamblado.....	89
Figura 113 Pintura electrostática de módulo.....	89
Figura 114 Módulo terminado	90
Figura 115 Paleta de empuje y plato giratorio	90
Figura 116 Colocación de servomotores	91
Figura 117 Colocación de cámara	91
Figura 118 Colocación de canaletas plásticas	91
Figura 119 Modulo clasificador de objetos.....	92
Figura 120 Primeras pruebas del actuador blando sin presurizar.....	93
Figura 121 Primeras pruebas del actuador blando presurizado	93
Figura 122 Pruebas finales del actuador blando sin presurizar	94
Figura 123 Pruebas finales del actuador blando presurizado	94
Figura 124 Primeras pruebas de interacción entre actuador blando y brazo robótico	95
Figura 125 Primeras pruebas de manipulación de objetos con distintas geometrías	96
Figura 126 Pruebas finales de interacción entre actuador blando y brazo robótico	97
Figura 127 Pruebas finales de manipulación de objetos con distintas geometrías	97

Figura 128 Primer diseño de paleta de empuje	98
Figura 129 Fallos en acople con servomotor	98
Figura 130 Pruebas finales con pieza extractora	99
Figura 131 Pruebas de detección color violeta	100
Figura 132 Pruebas de detección color azul	100
Figura 133 Pruebas de detección color verde.....	101
Figura 134 Pruebas de detección color naranja.....	101
Figura 135 Pruebas de detección color blanco	101
Figura 136 Clasificación de objetos	104
Figura 137 Plato giratorio con elementos clasificados	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de pinzas.....	8
Tabla 2 Características técnicas del robot	18
Tabla 3 Matriz de Pugh.....	30
Tabla 4 Criterios de selección de la morfología de los Pneu-net	33
Tabla 5 Criterios de selección de materiales de construcción Pneu-net.....	39
Tabla 6 Criterios de selección de materiales de construcción del sujetador	47
Tabla 7 Comandos y explicación programación robot	57
Tabla 8 Criterios de selección de materiales de construcción del módulo ...	59
Tabla 9 Criterios de selección de clasificador	60
Tabla 10 Criterios de selección de actuadores	64
Tabla 11 Selección de la alternativa adecuada para la tarjeta de control	69
Tabla 12 Criterios de Selección para el Sistema de Visión Artificial	71
Tabla 13 Tiempo de impresión de componentes del sujetador.....	74
Tabla 14 Duración de cada etapa de elaboración de actuadores blandos ..	77
Tabla 15 Zonas de clasificación y ángulos de giro.....	99
Tabla 16 Pruebas de manipulación con objetos irregulares	102
Tabla 17 Datos obtenidos de la frecuencia observada	106
Tabla 18 Resultados del cálculo de la frecuencia esperada	107
Tabla 19 Resultado de Chi - Cuadrado.....	107
Tabla 20 Costos del proyecto	108

RESUMEN

Este trabajo de titulación consiste en usar la tecnología de robótica blanda (soft robotics), para diseñar e implementar un sistema Mecatrónico de manipulación de objetos con geometrías irregulares, en el brazo robótico Mitsubishi de la universidad, además el proyecto consta de un módulo destinado a desarrollar la clasificación de cada uno de los objetos manipulados. Lo importante de esta pinza flexible basada en esta nueva tecnología, es que rompe las barreras de la sujeción de otras pinzas sin importar la forma o el tamaño de los objetos. La pinza flexible es desarrollada en un software asistido por computador y a su vez es sometida a análisis para después proceder a la fabricación del mismo investigando el mejor material de tipo elastómero y buscando que sea amigable con el medio ambiente, la energía que proporciona el movimiento a la pinza flexible es netamente neumática con lo que se consigue mantener la limpieza y la facilidad de acople con el manipulador. El modulo clasificador de objetos al igual que la pinza flexible, será diseñado utilizando un software de diseño asistido por computador. Este poseerá características de diseño similares a las otras estaciones debido a ello es modular, móvil y se acoplará fácilmente a los módulos ya existentes. La clasificación de los distintos objetos manipulados por la pinza flexible se la realiza mediante visión artificial en el cual se realiza la segmentación del color más característico que estos posean, clasificándolos en cuatro zonas distintas.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBOTICA**
- **ELASTÓMERO**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **ROBOT**
- **BRAZO ROBÓTICO MITSUBISHI**

ABSTRACT

This titration work consists of using soft robotics technology to design and implement a Mechatronic system for manipulating objects with irregular geometries in the university's Mitsubishi robotic arm. In addition, the project consists of a module designed to develop the classification of each of the manipulated objects. The important thing about this flexible clamp based on this new technology is that it breaks the barriers of the clamping of other clamps regardless of the shape or size of the objects. The flexible clamp is developed in computer assisted software and in turn is subjected to analysis and then proceed to manufacture the same by researching the best elastomer type material and seeking to be environmentally friendly, the energy provided by the movement to the flexible clamp is clearly pneumatic, which ensures that the cleaning and the ease of engagement with the manipulator is maintained. The object classifier module, like the flexible clamp, will be designed using computer aided design software. This will possess design characteristics similar to the other stations because of it is modular, mobile and will easily couple to existing modules. The classification of the different objects manipulated by the flexible clamp is made by means of artificial vision in which the most characteristic color segmentation is carried out that they possess, classifying them in four distinct zones.

KEYWORDS

- **ROBOTIC**
- **ELASTOMER**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **ROBOT**
- **ROBOTIC ARM MITSUBISHI**

PRESENTACIÓN

El presente proyecto describe el diseño e implementación de una pinza flexible basado en la tecnología de robótica blanda para manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular implementado en el brazo robótico Mitsubishi del Laboratorio de Mecatrónica

En el capítulo I, se definen los aspectos generales del proyecto de titulación como son sus antecedentes, justificación, objetivos, hipótesis, variables e indicadores y metodología de investigación.

En el capítulo II, se detalla toda la fundamentación teórica necesaria para realizar la pinza flexible como es: Robótica industrial, generaciones de los robots industriales, elementos terminales o actuadores finales en robots industriales, teoría de la robótica blanda, actuadores en la robótica blanda, control del actuador blando, y funcionamiento de actuadores blandos.

En el capítulo III, se describe el diseño Mecatrónico del sistema y selección de componentes, el cual constara de dos etapas. En la primera etapa se detalla y justifica el diseño del actuador blando y de la estructura diseñada para su implementación en el brazo robótico. En la segunda etapa se detalla el módulo de detección de objetos mediante visión artificial.

En el capítulo IV, se detalla todo el proceso de construcción e implementación de todo el sistema Mecatrónico.

En el capítulo V, se detallan las pruebas y resultados obtenidos entre el actuador blando, el brazo robótico y el módulo de detección de objetos.

En el capítulo VI, se presenta las conclusiones y recomendaciones de todo el sistema desarrollado.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

La génesis de la robótica se inicia en el año 1948, cuando George Devol considerado como el pionero de esta ciencia crea un manipulador programable el cual fue el precursor del robot industrial. Desde ese año todo fue logros y avances para los robots, sustituyendo la transmisión mecánica por eléctrica y utilizando servocontroles, además se insertan los robots a la industria. (“Robot industrial”, 2017)

(“Robot industrial”, 2017) afirma que el primer robot industrial llamado Unimate fue creado por George Devol y Joseph F. Engelberger en el año de 1958, este tenía la función de manipular y transportar objetos en la empresa General Motors. Desde el año de 1962 en que el robot Unimate inicia sus operaciones en la industria, se crean asociaciones de robótica en Japón (JIRA) y estados Unidos (RIA).

En 1973 se desarrolló el primer robot con accionamiento eléctrico creado por la firma sueca ASEA. La configuración mecánica de estos robots correspondía a las configuraciones esférica y antropomórfica, posteriormente se insertan en el mercado robots con configuraciones nuevas como son SCARA y PUMA. (“Robot industrial”, 2017)

Debido a las altas necesidades industriales percibidos en la actualidad, Mitsubishi Electric propone gran variedad de modelos de robots. Todos sus robots son potentes, rápidos y compactos, características por las cuales se ha implementado en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga una unidad la cual cumple un trabajo de manipulación y montaje en un solo módulo de trabajo. El mundo de la robótica evoluciona continuamente, es así que ha sustituido al ser

humano en varias actividades y es empleado en varias aplicaciones, simplemente intercambiando el efector final o herramienta del robot con avances tecnológicos, tanto así que se crea la tecnología de la robótica blanda, término utilizado para identificar a robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales.

Con el origen de esta tecnología se obtienen varios proyectos, desde emulación de movimientos animales, pinzas blandas, hasta la emulación de órganos humanos, tales como Roboy que se desarrolló en el Laboratorio de Inteligencia Artificial en la Universidad de Zurich el cual utiliza tendones artificiales para moverse. (Posel, 2013)

Así también la Universidad de Harvard, específicamente la disciplina de “soft robotics” presento un experimento de mezcla de gases, metano y oxígeno, activa el mecanismo que permite a un diminuto robot saltar algo más de 30 centímetros. (Pujol, 2017). En esta misma universidad se desarrollado un nuevo tipo de músculo artificial que cuenta con cualidades que pueden revolucionar la robótica blanda. (Arteaga, 2016)

1.2 Justificación

Los motivos que llevaron a investigar una nueva tecnología de pinzas o sujetadores, se centra en que los tradicionales presentan muchas limitaciones y problemas en su uso, las que ha destacar son; objetos con formas irregulares, distancia de apertura, fuerza de sujeción. Lo cual ha generado gastos excesivos al momento de adquirir una pinza para la aplicación de manipulación de objetos.

Se pretende entonces sustituir los tradicionales sujetadores metálicos por sujetadores robóticos blandos los cuales presentan mejores prestaciones para la actividad de manipulación de cualquier objeto irregular, sin importar distancia de apertura y fuerzas de sujeción, manteniendo y cuidando el producto a manipular, algo de suma importancia en esta aplicación, promoviendo la optimización de tecnologías y recursos.

Es preciso desarrollar esta nueva tecnología de pinzas en los brazos robóticos de la institución, siendo de los primeros en el país en implementar estas nuevas tecnologías robóticas. Por tal motivo es necesario analizar e investigar esta temática y abrir un nuevo campo de estudio llamado Robótica Blanda.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar una pinza flexible basada en la tecnología de robótica blanda para manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular implementado en el brazo robótico Mitsubishi del Laboratorio de Mecatrónica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar el estado del arte para brazos robóticos industriales aplicando la tecnología de robótica blanda con el fin de conocer el tipo de aplicación en la que se usan.
- Diseñar mediante un software asistido por computador el sujetador flexible para la obtención de parámetros necesarios en el Diseño de la pinza
- Realizar un análisis estático del sujetador flexible empleando un software de ingeniería asistida por computador para conocer factores máximos de diseño
- Implementar el sujetador al brazo robótico Mitsubishi mediante un acople rápido para su fácil instalación
- Diseñar e implementar un sistema de control cerrado que sea compatible con el sistema de control del brazo robótico Mitsubishi
- Realizar pruebas de funcionamiento del sujetador flexible acoplado al brazo robótico Mitsubishi

1.4 Hipótesis

¿El diseño e implementación de una pinza o sujetador flexible basado en robótica blanda ayudara a la manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular?

1.5 Variables e Indicadores

Variable Independiente: Pinza flexible basado con tecnología de robótica blanda.

Variable Dependiente: Manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular.

1.6 Metodología

El proyecto se desarrolló con la siguiente metodología:

Método documental-bibliográfico: En nuestra investigación se usará diferentes fuentes bibliográficas con lo que se pretende obtener información para realizar el diseño CAD de la pinza y conocer el método de control más adecuado para su implementación

Método experimental: Este método de investigación permite interpretar la información adquirida con la investigación documental bibliográfica para obtener resultados.

Método deductivo: Mediante este proyecto de investigación se propone una hipótesis, que mediante el cumplimiento del cronograma del proyecto se podrá comprobar su veracidad.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Robótica industrial

La Robótica industrial mostrada en la figura 1, puede definirse como “el estudio, diseño y uso de robots para la ejecución de procesos industriales, el estándar ISO lo define como un manipulador programable en tres o más ejes multipropósito, controlado automáticamente y reprogramable” (“Robot industrial”, 2017).



Figura 1 Robot industrial KUKA

Fuente: (“Robot industrial”, 2017)

2.2 Generaciones de los robots industriales

Los robots industriales se clasifican de acuerdo a su generación de la siguiente manera:

Primera generación: Son robots manipuladores como se indica en la figura 2. Estos robots contienen sistemas mecánicos multifuncionales que operan con un sistema de control de lazo abierto simple, esto representa que no existe retroalimentación por parte de sensores y realizan tareas programadas por el usuario para ser ejecutadas. (Aitken, 2017)



Figura 2 Unimate robot industrial primera generación

Fuente: ("The History Of Artificial Intelligence", 2015)

Segunda generación: Robots de aprendizaje. El operador humano realiza los movimientos que desea que el robot los ejecute como se indica en la figura 3, los realiza por medio de un dispositivo mecánico mientras el robot repite los movimientos y los memoriza. (Aitken, 2017)



Figura 3 Robot industrial segunda generación

Fuente: (Hexagon Metrology, 2017)

Tercera generación: Robots con control sensorizado. Poseen un sistema de control cerrado controlado por el ordenador en la cual se programa de manera textual las operaciones que se requiere que el robot ejecute como se indica en la figura 4. (Aitken, 2017)



Figura 4 Robot industrial tercera generación

Fuente: (SIEO Group, 2017)

Cuarta generación: Robots inteligentes. Se destacan por poseer sensores que envían información en tiempo real al controlador indicando el estado del proceso como se muestra en la figura 5. Esto permite tomar las mejores decisiones durante el control del proceso. (Aitken, 2017)



Figura 5 Robot industrial cuarta generación

Fuente: ("MassRobotics Partners on Advanced Robotics Manufacturing Institute", 2017)

2.3 Elementos terminales o actuadores finales en robots industriales

El actuador final es un elemento importante en aplicaciones industriales el cual aumenta las capacidades del manipulador industrial. Este dispositivo representa la herramienta especial que permite al manipulador realizar una aplicación específica, debido a ello este debe diseñarse específicamente para dicha actividad. (Gonzales, 2012)

Las pinzas se utilizan para tomar un objeto como se indica en la figura 6, normalmente la pieza de trabajo, y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. Existen varios métodos de sujeción disponibles, además de los métodos mecánicos de agarre. Estos métodos alternativos de sujeción emplean casquetes de sujeción, imanes, ganchos, y cucharas. (Gonzales, 2012)



Figura 6 Pinzas

Fuente: (Robotiq, 2016)

De acuerdo con (Gonzales, 2012) las pinzas se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado indicado en la tabla 1.

Tabla 1
Clasificación de pinzas

Tipo	Accionamiento	Uso
Pinza de presión angular lineal	Neumático o eléctrico	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe ejercer presión de agarre
Pinza de enganche	Neumático o eléctrico	Piezas de grandes dimensiones
Ventosa de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferromagnéticas

Fuente: (Gonzales, 2012)

(Gonzales, 2012) afirma que el accionamiento neumático es el más utilizado debido a su simplicidad, precio y fiabilidad, no obstante el controlar el fluido es más complejo. Frecuentemente se utilizan accionamientos eléctricos. Para conocer el estado de la pinza (abierto o cerrado), se usan

sensores. De igual manera para controlar el estado de la pinza se pueden usar detectores de proximidad, sensores fuerza par o sistemas de visión artificial que incorporen datos geométricos de los objetos.

El diseño de la pinza puede basarse en otros elementos comerciales para cada aplicación. Sin embargo, se recomienda desarrollar el actuador íntegramente al robot y de acuerdo al tipo de aplicación a desarrollarse lo cual presenta un porcentaje importante dentro del coste total de fabricación. Los tipos de pinzas más usados son de tipo pivotante como se muestra en la figura 7, la función de esta pinza es abrir y cerrar. (Gonzales, 2012)



Figura 7 Gripper angular

Fuente: (“The difference between robotic grippers with parallel, three-finger, and angled designs”, 2011)

Otro tipo de pinzas se denominan de movimiento lineal. En este caso, los dedos se abren y se cierran ejecutando un movimiento paralelo entre sí como se muestra en la figura 8. (Gonzales, 2012)



Figura 8 Gripper paralelo

Fuente: (Bélanger-Barrette, 2016)

En la elección o diseño de una pinza se han de tener en cuenta diversos factores. Entre los cuales son el tipo de objeto a manipular, la forma, el peso, el tamaño y la fuerza necesaria para ejercer y mantener sujetado al objeto. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso el cual afectara las inercias del robot, el tipo de accionamiento y el sistema de control. El principio de diseño de la pinza es que debe sujetar a la pieza de trabajo por su centro de gravedad eliminando los momentos que se pudieran generar por el peso de la pieza de trabajo. (Gonzales, 2012)

Como se describió anteriormente existen varios parámetros que limitan los diseños actuales de pinzas para el brazo robótico, debido a ello surge la necesidad de buscar nuevas alternativas de diseño, nuevos materiales de construcción que sean capaz de realizar las mismas funciones y más. Entonces se ha desarrollado la robótica blanda, la cual posee un alto campo de aplicaciones, en nuestro caso es el diseño de una pinza flexible.

La robótica blanda ocupa elastómeros para su construcción, lo cual es muy efectivo en la manipulación de objetos, no hay que preocuparse por la geometría de los objetos a manipular y lo más importante es que esta nueva tecnología usa accionamiento neumático. A continuación se detallara lo más relevante hasta la fecha acerca de la robótica blanda.

2.4 Teoría de la robótica blanda

La revolucionaria forma de superar los problemas de la robótica convencional es a través de la robótica blanda. Se denomina de esta forma a los sistemas robóticos que utilizan materiales elastoméricos en vez de plásticos rígidos o metal para su construcción como se indica en la figura 9. El resultado es un robot flexible y elástico, capaz de soportar caídas y golpes, puede comprimirse para caber en espacios reducidos y de realizar movimientos más complejos y naturales. (Harvard, 2017)

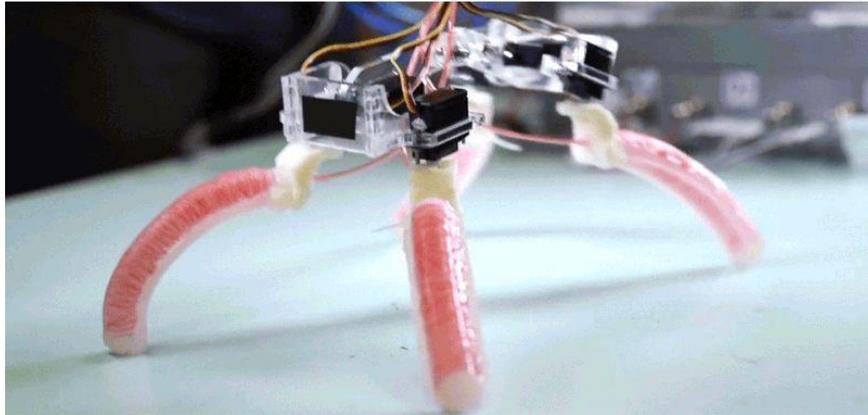


Figura 9 Pulpo diseñado con robótica blanda

Fuente: (Zavia, 2016)

Este nuevo campo de la robótica se encuentra inspirada en los sistemas biológicos de peces, calamares o incluso en la trompa de elefantes, para llegar allá donde las estructuras rígidas no pueden hacerlo, es por esto que esta tecnología está emergiendo con fuerza. Estos robots además de poseer una estructura blanda, poseen una red de canales huecos por los que se hace pasar un fluido y dan su parecido a estructuras biológicas estas pueden llegar a ser de lo más simples hasta lo más complejo que se podría imaginar. (Harvard, 2017)

(Barbuzano, 2014) afirma que “los robots blandos son altamente adaptables a una amplia gama de tareas y entornos, son ideales para la interacción con los seres humanos, desde la asistencia en actividades diarias a la realización de la cirugía mínimamente invasiva”.

Es por ello que la eficiencia en este tipo de robots surge en cuanto a la ubicación de cada una de las extremidades del robot, que no son necesarias al momento de ejecutar acciones como lo son en los robots tradicionales, sino que van reaccionando ante el entorno, además otra de las ventajas que posee esta nueva rama de la robótica sobre la robótica clásica, es que sus actuadores al poseer la forma de una mano, pierde la limitación a la hora de manipular objetos con propiedades cambiantes.

2.5 Actuadores en la robótica blanda

Debido a las dificultades de trabajar con estructuras blandas, principalmente el generar movimiento, se ha tratado de imitar los músculos de los animales utilizando distintos actuadores, es decir, dispositivos que ejercen fuerza sobre el cuerpo para que se deforme. En la actualidad existen tres formas de actuación populares para los robots blandos.

Actuadores dieléctricos elastoméricos (DEA): Están hechos de elastómeros dieléctricos, materiales inteligentes estudiados desde finales de los 90', que se deforman cuando son expuestos a diferencias de voltaje, imitando muy bien a los músculos y presentan un relativo alto desempeño deformación/esfuerzo y potencia por unidad de masa indicados en la figura 10. Sin embargo, tienen la desventaja de que para la mayoría de los diseños es necesario agregar marcos rígidos para pretensar los actuadores, y aquellos diseños que no lo incorporan realizan esfuerzos bajos y tienen procesos de fabricación complicados. (Kovacs, Lochmatter, & Wissler, 2007)

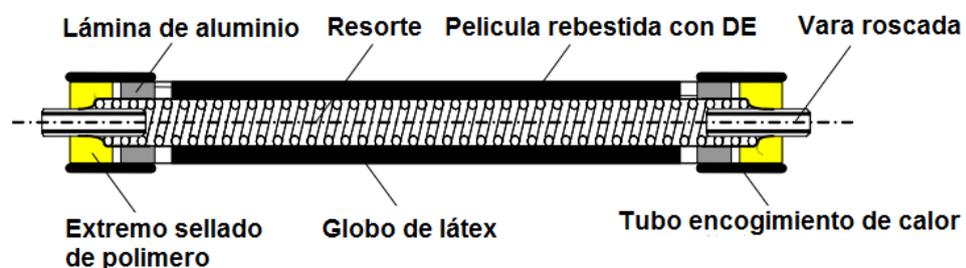


Figura 10 Corte longitudinal de actuador con dieléctrico elastomérico

Fuente: (Kovacs et al., 2007)

Aleaciones con memoria (SMA): El uso de aleaciones con memoria como actuador para robots blandos es una práctica popular entre los desarrolladores, ya que tienen una alta relación masa/fuerza específica. Debido a que la deformación es baja (alrededor de 5%) en aleaciones Níquel-Titanio comunes, en general se utilizan pequeños resortes hechos con alambre delgado de aleación para aumentar la deformación total y son integrados al cuerpo blando para lograr su deformación como se indica en la figura 11. La actuación en este caso depende de la temperatura, lo que

exige que los robots que utilizan este sistema de actuación tengan un sistema robusto de control de temperatura antes distintos escenarios térmicos, lo que supone un desafío. (Vergara, 2015)

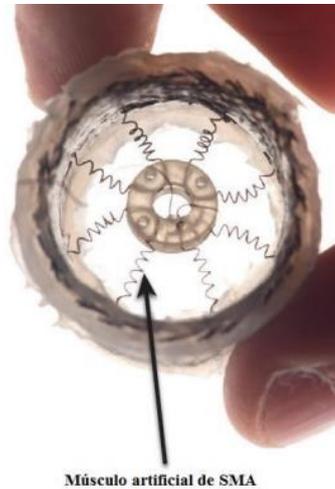


Figura 11 Cuerpo blando con actuación radial por resortes de SMA

Fuente: (Vergara, 2015)

Aire comprimido y fluidos presurizados: Mediante el inflado de materiales blandos con inyección de aire comprimido o fluidos presurizados es posible obtener un sistema de actuación poderoso capaz de ejercer relativamente grandes fuerzas y deformaciones como se muestra en la figura 12. En particular, mediante el adecuado diseño del cuerpo blando es posible generar distintas cámaras que permitan controlar el movimiento del robot al inflar dichas cámaras por separado o en distintas combinaciones. Sin embargo, podría requerirse alta potencia o sistemas complejos de suministro de aire comprimido. (Vergara, 2015)



Figura 12 Robot blando accionado por aire comprimido

Fuente: (Vergara, 2015).

Este último tipo de actuador blando, es el más desarrollado en la actualidad, denominados Pneu-nets Bending Actuators (Actuadores flexibles de redes neumáticas) los cuales son actuadores elastoméricos accionados neumáticamente de peso ligero, bajo costo y fabricación moderada, capaz de proporcionar un movimiento no lineal con entradas simples como se muestra en la figura 13.

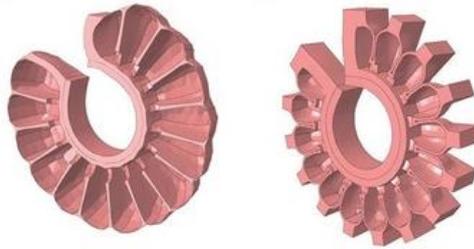


Figura 13 Actuadores flexibles de redes neumáticas

Fuente: (Mosadegh, 2014)

Según estudios realizados por (Mosadegh, 2014) este actuador tiene otras dos características importantes:

- Es suficientemente durable que puede sostener una frecuencia intermedia 4 Hz, movimiento de gran amplitud que soporta más de un millón de ciclos repetidos sin fallo.
- Se muestra un nuevo modo de accionamiento. A bajas tasas de inflación, se dobla en aproximadamente un círculo con todas las cámaras infladas uniformemente; a altas tasas de inflación, se curva sobre sí mismo con las cámaras en su punta infladas como se muestra en la figura 14.

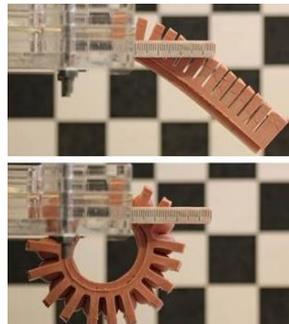


Figura 14 Pneu-nets Bending Actuators

Fuente: (HAO Yufei et al., 2016)

Según estudios realizados por (Mosadegh, 2014) afirma que la velocidad angular de la flexión de una estructura accionada por un Pneu-net (redes de pequeños canales incrustados en estructuras elastoméricas que pueden ser inflados con bajas presiones de aproximadamente 50 kPa de aire) depende de:

- La tasa de inflación
- La geometría de los canales internos y paredes exteriores
- Las propiedades de la estructura (es decir, los materiales utilizados para la fabricación)

La activación del actuador blando según (Mosadegh, 2014) se realiza mediante accionamiento neumático, debido a que el aire presurizado tiene cuatro ventajas:

- Proporciona una rápida inflación de la estructura neumática (ya que el aire tiene una baja viscosidad y se puede mover rápidamente)
- Es fácilmente controlable y medible (usando reguladores y sensores)
- Está disponible casi universalmente (ya sea desde los tanques de gas comprimido o compresores)
- Es ligero de peso y puede ser desechado después de su uso mediante la ventilación a la atmósfera.

A continuación se detalla los tipos de aplicaciones en los cuales se usan los Pneu-nets Bending Actuators (Actuadores flexibles de redes neumáticas).

Manipulación de objetos: Desarrollado por ingenieros de Soft Robotics de la universidad de Cambridge, este actuador blando ha sido implementado para servir a las industrias en el almacenamiento y transporte de alimentos debido a su capacidad de agarrar con seguridad y transportar objetos delicados ilustrados en la figura 15. En la figura 16 se indica que con estos actuadores blandos es posible la manipulación de cualquier objeto con distinto tamaño o peso. (Wheeler, 2016)

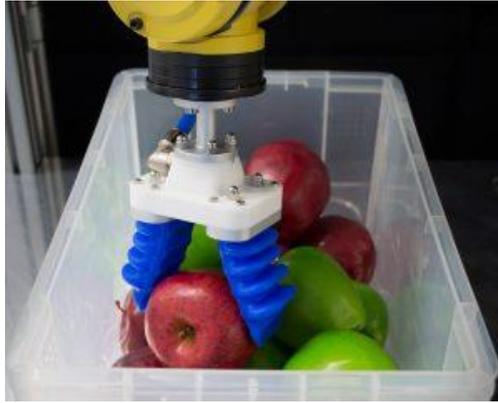


Figura 15 Pinza flexible Manipulación de frutas

Fuente: (Wheeler, 2016)

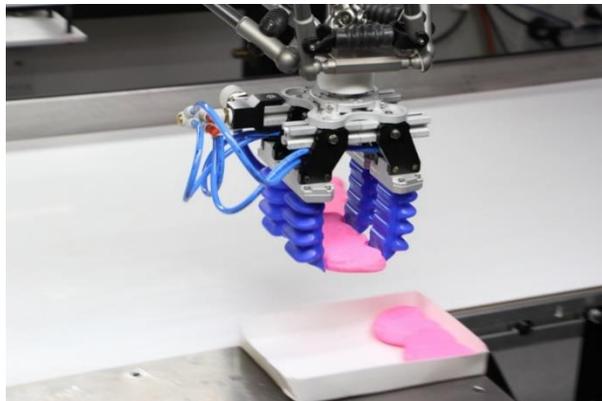


Figura 16 Pinza flexible Manipulación de distintos objetos

Fuente: (Heater, 2017)

Exoesqueletos inflables: Desarrollado por ingenieros de la universidad de Harvard, son parecidos a guantes que contienen una membrana inflable que se expande para su activación como se indica en la figura 17, usados para rehabilitación o aumento de potencia en el agarre de personas con distrofia muscular. (Marinov, 2015)



Figura 17 Exoesqueletos inflables

Fuente: (Marinov, 2015)

Exploración en ambientes acuáticos: Investigadores de Harvard proporcionan pinzas flexibles para la recolección de especímenes submarinos delicados como se muestra en la figura 18. Esto muestra que el actuador blando además de proporcionar un agarre delicado, es capaz de usarse en ambientes no habituales. (River Charles, 2016)

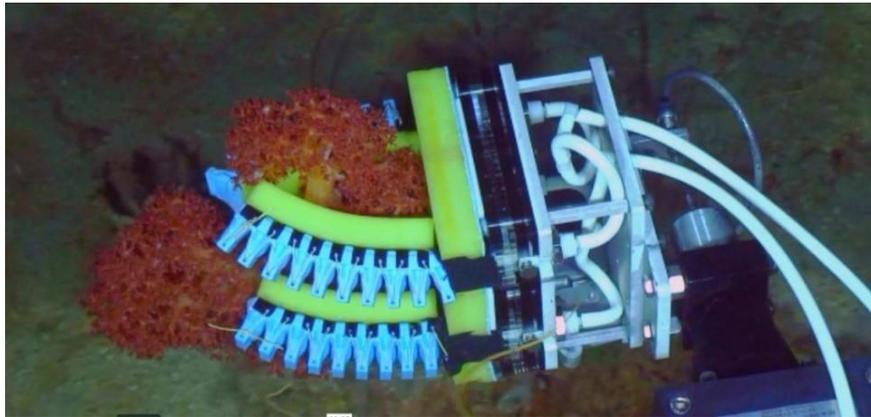


Figura 18 Exploración en ambientes acuáticos

Fuente: (River Charles, 2016)

2.6 Control del actuador blando

Mediante los estudios realizados por (Connolly, Walsh, & Bertoldi, 2017) se tiene que:

Con el fin de controlar actuadores suaves, se necesita medios para verificar su cinemática, fuerzas de interacción con los objetos en el medio ambiente y la presión interna. Esto se logra mediante el uso de sensores totalmente suaves, (todavía en desarrollo) o sensores flexibles que se pueden incorporar en el diseño del actuador durante el proceso de fabricación. Para controlar el flujo de aire en el actuador, se usan componentes externos, tales como válvulas electrónicas, bombas, reguladores, sensores, y los tableros de control.

2.7 Robot Mitsubishi RV-2SDB

“Robot con seis grados de libertad como se observa en la figura 19, el cual está diseñado para un rendimiento óptimo con un alcance máximo para cubrir el área de trabajo cerca de la unidad” (FESTO, 2006).



Figura 19 Robot Mitsubishi R V2-2SDB

Fuente: (FESTO, 2017)

A continuación en la tabla 2 se describe las características técnicas más relevantes del robot RV-2SDB

Tabla 2
Características técnicas del robot

Modelo RV-2SDB	
Grados de libertad	6
Motores	Servomotores AC (todos los ejes con freno)
Detección de posición	Encoders absolutos
Máxima carga (Kg)	3
Longitud del brazo (mm)	230
Alcance radial máximo (mm)	270
Límites (grados)	J1 480(-240~+240)
	J2 240(-120~+120)
	J3 160 (0~+160)
	J4 400 (-200~+200)
	J5 240 (-120~+120)
	J6 720 (-360~+360)
Velocidad máxima (grados/s)	J1 255
	J2 150

CONTINÚA →

	J3	275
	J4	412
	J5	450
	J6	720
Velocidad máxima (mm/s)		4.400
Repetibilidad (mm)		±0.02
Peso (Kg)		19
Cableado		4 entradas (pinza) / 4 salidas (base)
Conexiones aire		ø4mm x 4 en la base
Instalación		Suelo o techo

Fuente: (Mitsubishi, 2010)

El brazo del robot “tiene integradas en su interior una serie de conductos que permiten la conexión de pinzas y ventosas neumáticas. También tiene integrado un conector para cuatro sensores, y la posibilidad de utilizar pinzas de accionamiento eléctrico” (FESTO, 2006).

El robot dispone de puertos RS232 y 16 entradas y salidas digitales para establecer comunicación con otros periféricos. Además es posible ampliar las señales de entrada y salida a 240 cada uno. Otro medio de comunicación que dispone es mediante el protocolo TCP/IP. (FESTO, 2006)

2.7.1 Controlador (CR2-571)

De acuerdo con (FESTO, 2006) se conoce que:

El controlador se basa en el mismo que utilizan los robots de mayores dimensiones de la marca trabajando con las mismas posibilidades y, lo más importante, el mismo lenguaje de programación. El controlador es un CPU de 64 bit que permite la ejecución en paralelo de hasta 32 programas en modo multitarea. Es decir, mientras se está moviendo puede recibir datos, activar o desactivar entradas y salidas, hacer cálculos, y 28 tareas más. (p.12)

En la figura 20 se muestran las partes que conforman el controlador del robot.



Figura 20 Partes del controlador

Fuente: (Mitsubishi, 2010)

De acuerdo con (FESTO, 2006) la función de cada uno de los elementos del controlador es:

1. Start: Botón que ejecuta el programa requerido y activa al robot.
2. Stop: Botón que detiene al robot de inmediato
3. Reset: Resetea el sistema. Además, también reestablece la ejecución de un programa que se ha detenido.
4. Paro de emergencia: En caso de existir un estado de emergencia este botón detiene al robot.
5. Chng disp: Usado para cambiar los detalles desplegados en el display en el orden de: “programa N°” - “línea N°” – “velocidad”.
6. End: Detiene el programa que se está ejecutando en la última línea.
7. Servo on: Activa el servo (el servo queda encendido).
8. Servo off: Desactiva el servo (el servo queda apagado).
9. Status number (display panel): Panel en donde se indica el número del error, el número del programa y el porcentaje de velocidad.
10. Interruptor de cambio de modo: Activa los diferentes modos de operación del robot.
 - a. Automático: Las operaciones desde el controlador o equipo externo son válidas. Las operaciones realizadas con el

dispositivo externo o T/B no son posibles. Es necesario ajustar el parámetro para los derechos de operación a la conexión entre el panel de operación y el equipo externo.

- b. Teach: cuando este modo es seleccionado el T/B es activado, esto nos da a entender que las operaciones y los movimientos quedan restringidos para lo que se ordene desde el teaching box.

- 11.Up/down: Estos botones funcionan como canal de desplazamiento (hacia arriba y abajo) en el display.
- 12.Conexión de teaching box: Puerto de conexión del teaching box al controlador.
- 13.Cubierta de interfaz: La interfaz USB y la batería están montadas
- 14.Conector a PC: éste es un emisor-receptor de datos de especificación RS-232C para hacer la conexión entre el controlador y el PC.

2.7.2 Botonera de Mando (T/B)

“También llamado teach pendant, se utiliza para determinar las posiciones del brazo robot. Para ayudar en la programación y para el control del robot, tiene integrado un visualizador LCD”. (Ospina, 2007)

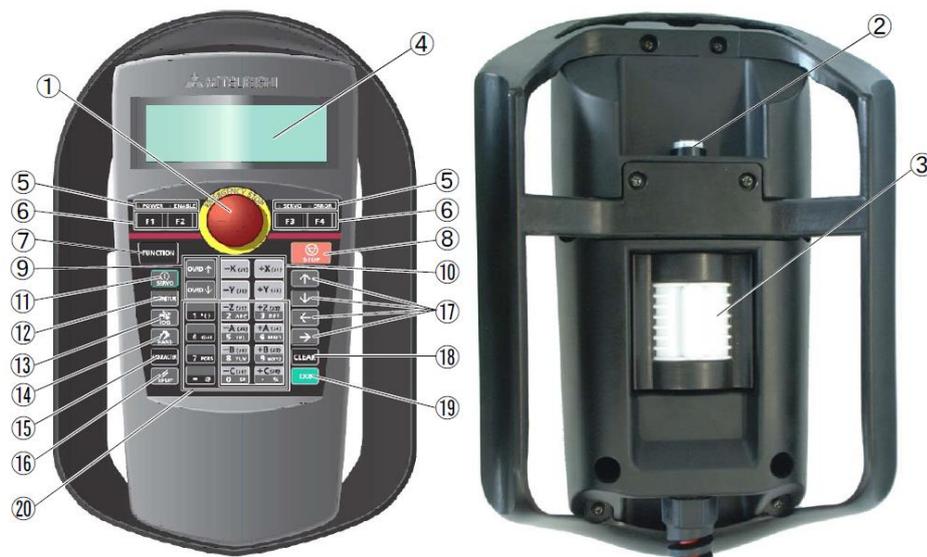


Figura 21 Partes de la Botonera de mando

Fuente: (Mitsubishi, 2010)

De acuerdo con (Mitsubishi, 2010) a continuación se describen las partes de la botonera de mando T/B presentes en la figura 21:

1. Emergency stop: tiene como función la activación de los paros de emergencia, desenergizando la estación. Para cancelar este estado girar el interruptor en el sentido de las manecillas del reloj.
2. Enable/disable: es un interruptor que activa o desactiva el teach pendant como controlador principal del brazo robot.
3. Enable: cuando el interruptor [enable/disable] es presionado el servo se prendera, si este es liberado o presionado fuertemente el robot se detendrá inmediatamente
4. Visualizador lcd: en esta pantalla se muestra el contenido del programa que se está creando o ejecutando desde el teaching box, las funciones actuales del robot y los modos de operación del mismo.
5. Indicador de estado: muestra el estado del robot o t / b.
6. [f1], [f2], [f3], [f4]: ejecuta la función correspondiente a cada función visualizada en el lcd.
7. Función: cambia las funciones y las muestra en el display
8. Stop: al presionar este botón los programas que estén corriendo se detendrán.
9. Ovr ↑ , ovr ↓: cambia la velocidad de desplazamiento del robot
10. Jog teclas de operacion: mueve al robot de acuerdo al modo jog, y muestra el valor numérico
11. Servo: mantener presionada esta tecla para encender los servos
12. Monitor: visualiza el monitor menú
13. Jog: modo jog y visualiza la operación jog
14. Hand: modo hand y visualiza la operación hand
15. Char: cambia la pantalla de edición, y cambia los números por caracteres alfabéticos
16. Reset: resetea el error. Se reiniciará el programa si se pulsa esta tecla y la tecla exe.
17. [↑] [↓] [←] [→] : mueve el cursor en cada una de esas posiciones
18. Clear: borra un carácter en la dirección del cursor

19. Exe: la operación de entrada es fija. Y mientras presiona esta tecla, el robot se mueve cuando está en modo directo.
20. Number/character: borrar un carácter en la posición del cursor e ingresa el número o el carácter

2.7.3 COSIROP. Software de programación robot RV-2SDB

En base al estudio realizado por (Ospina, 2007) tenemos que:

COSIROP es el entorno de programación para todos los robots de Mitsubishi. Le permite crear programas para robots en pocos minutos usando los lenguajes de programación de robots MELFA BASIC IV o el MOVEMASTER COMMAND. Después de verificar y optimizar el programa se puede transferir al robot, mediante una eficiente red directa o conexión en serie entre un PC y el robot.

Mientras los programas se están ejecutando se puede monitorear y visualizar el robot con la ayuda de las amplias funciones de control y diagnóstico de COSIROP. La velocidad en tiempo real de los ejes y las corrientes de motor son mostradas de forma clara, junto con el estado de las entradas y salidas del robot.

2.8 Clasificación automática de objetos

Para la clasificación automática de objetos se hará uso de software libre tales como OpenCV y Python encargados del procesamiento digital de la imagen y Arduino software para comandar los distintos elementos involucrados en el proceso de clasificación.

La definición de OpenCV viene dado por (OpenCV team, 2017) en el cual:

OpenCV es una biblioteca de visión artificial de código libre escrita en C++, su logo se observa en la figura 22, originalmente desarrollada por Gary Bradsky en Intel. Fue construida para proporcionar una

infraestructura común para aplicaciones de visión por computador. La librería contiene más de 2500 algoritmos optimizados, entre los que se incluyen algoritmos clásicos y algoritmos del estado del arte de los campos de visión por computador y aprendizaje automático.

La definición del lenguaje de programación Python viene establecido por (Python Software Foundation., 2017) en el cual:

Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender, cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos, su logo se observa en la figura 22. La elegante sintaxis de Python, junto con su naturaleza interpretada, hace de éste un lenguaje ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas.



Figura 22 Logos OpenCV y Python

Fuente: (Lara, 2014)

A continuación se describen las librerías más importantes para realizar el proceso de clasificación automática de objetos mediante el reconocimiento, la filtración y segmentación del color más característico del objeto. “La gran mayoría de aplicaciones que se desarrollan con OpenCV necesitan como entrada una o varias imágenes, pero también puede ser que esas imágenes se presenten en forma de vídeo” (Crespo, 2017).

2.8.1 Lectura y guardado de imágenes

De acuerdo con (Crespo, 2017) para realizar la lectura y guardado de imágenes hay que utilizar la función **cv2.imread** ("imagen", cv2.IMREAD_COLOR) para leer una imagen. La imagen debe estar en el directorio de trabajo o debe proporcionarse la ruta absoluta de la imagen. El segundo argumento de la función es un indicador que especifica la forma en la que la imagen debe ser leída.

Se usa la función **cv2.imwrite** ("imagen.jpg",img) para guardar la imagen deseada, el primer argumento es el nombre de la nueva imagen con la extensión (jpg o png) entre las más comunes, el segundo es la fuente de obtención de la imagen. (Crespo, 2017)

2.8.2 Capturar video webcam

Es posible leer imágenes desde la cámara web del ordenador, para ello se usa el objeto de tipo **cv2.VideoCapture (0)**. El argumento puede ser tanto el índice del dispositivo a utilizar o nombre del fichero a reproducir. El argumento (0) es el número que identifica que cámara capturar. Como normalmente sólo suele haber una cámara conectada, se suele utilizar el identificador "0". (Crespo, 2017)

Para capturar un cuadro de video se usa **cap.read ()** el cual devuelve un valor booleano (True/False). Si el cuadro de video se leyó correctamente, devolverá True. De esta forma, se puede comprobar cuándo se ha llegado al final de la lectura del vídeo comprobando este parámetro. Al terminar se usa **cap.release ()** para liberar los recursos. (Crespo, 2017)

2.8.3 Suavizado de imágenes

El objetivo de esta operación es eliminar o reducir el ruido mediante la convolución de la imagen con un filtro *paso-bajo*, con esto se elimina el contenido de altas frecuencias. (Crespo, 2017)

OpenCV proporciona varias técnicas para el suavizado de imágenes. A continuación detallaremos solo el filtro a usar en nuestra aplicación:

2.8.4 Filtro Gaussiano

El filtro gaussiano se usa para emborronar imágenes y eliminar ruido como se observa en la figura 23, cuya función es **cv2.GaussianBlur ()**. Se debe especificar el ancho y alto del kernel (matriz de coeficientes), que debe ser un número impar positivo. Además, también debe especificarse la desviación estándar en las direcciones X, Y, a través de los parámetros sigmaX y sigmaY respectivamente. (Crespo, 2017)



Figura 23 Filtrado Gaussiano

Fuente: (Haenel, 2012)

2.8.5 Colores y espacios de color

Para nuestra aplicación necesitamos convertir las imágenes RGB a HSV (del inglés Hue, Saturation, Value – Matiz, Saturación, Valor). Esto se debe porque en RGB no es bueno para el procesamiento de imágenes debido a su alto grado de correlación entre sus componentes. En cambio en HSV gracias a sus componentes intensidad e información cromática los hace ideal para la segmentación del color como se observa en la figura 24. (Crespo, 2017)

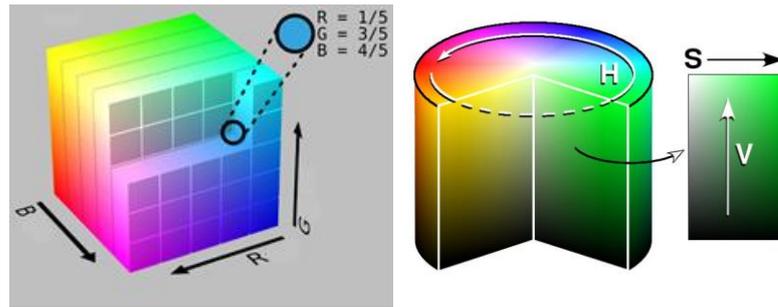


Figura 24 Espacios de color RGB y HSV

Fuente: (Crespo, 2017)

Para la conversión del espacio de color, debemos utilizar la función **cv2.cvtColor (input_image, flag)**, donde el flag indica el tipo de conversión a realizar. El flag para convertir de RGB a HSV es ***cv2.COLOR_BGR2GRAY**. (Crespo, 2017)

2.8.6 Seguimiento de objetos

Después de la conversión de BGR a HSV es posible extraer el objeto del color deseado para ello es necesario crear un rango para cada color como se observa en la figura 25, para ello se hace uso de la función **numpy** en Python para establecer los rangos en los cuales se encuentra el color deseado. Luego se crean mascarar con la función **cv2.inRange ()**, y se obtiene la extracción del color deseado como se muestra en la figura 26. (Crespo, 2017)



Figura 25 Rango de colores en HSV

Fuente: (Crespo, 2017)



Figura 26 Seguimiento de objeto de color deseado

Fuente: (Opencv dev team, 2014)

PyQt4 es “un enlace de la biblioteca gráfica Qt para el lenguaje de programación Python. La biblioteca está desarrollada por la firma británica *Riverbank Computing* y está disponible para Windows, GNU/Linux y Mac OS X bajo diferentes licencias” (Python Software Foundation., 2015).

Su logo se muestra en la figura 27.



Figura 27 Logo PyQt

Fuente: (Python Software Foundation., 2015)

Arduino es ideal para comandar elementos externos mediante un entorno de programación amigable. En el cual (MCI electronics, s/f) lo define como:

Una plataforma de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Arduino puede sentir el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el *Arduino Programming Language* (basado en Wiring) y el *Arduino Development Environment* (basado en Processing).



Figura 28 Logo Arduino

Fuente: (MCI electronics, s/f)

CAPÍTULO III

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA MECATRÓNICO

En este capítulo se detalla el diseño Mecatrónico del actuador blando y del módulo de clasificación de objetos con sus respectivos criterios de selección de material de construcción. Primeramente se establecen los materiales de construcción, parámetro importante en el desarrollo del actuador blando y demás componentes, luego la morfología y modelado CAD del actuador blando, posteriormente se indica el diseño mecánico de toda la pinza flexible, para luego mostrar el accionar electro neumático del actuador blando conjunto al brazo robótico. Finalmente se diseña el módulo clasificador de objetos detallando sus componentes mecánicos, electrónicos y su sistema de control.

3.1 Parámetros de diseño

Actualmente las limitaciones que surgen al manipular objetos con brazos robóticos son grandes, debido a su diseño con materiales rígidos y morfología simple, para ello se requiere diseñar e implementar una pinza flexible de fácil instalación y compacta, cuyo diseño y material solucione dichas limitaciones al manipular objetos de distinto tipo y en distinto ambiente.

Además se requiere implementar un módulo didáctico clasificador de objetos que trabaje en conjunto con la nueva pinza flexible y brazo robótico del laboratorio, para ello este módulo debe tener características de diseño similares a la estación robot presente en el laboratorio.

3.2 Diseño de actuadores blandos

A continuación se presentan distintas alternativas para el diseño de los Pneu-nets, con el fin de definir la alternativa correcta se establece el uso de la matriz de Pugh, la cual (Sejzer Raul, 2016) la define como:

Una herramienta cuantitativa que permite comparar opciones entre sí mediante un arreglo multidimensional. Su aplicación más habitual es durante la fase de diseño de un producto, ya sea completamente nuevo o una actualización de uno existente. El primer paso es identificar los criterios que serán evaluados. Estos son ubicados generalmente como filas de la matriz. Luego se deben especificar los posibles conceptos de diseño que apunten al cumplimiento de los criterios definidos. Los mismos aparecerán en las columnas de la matriz como se indica en la tabla 3.

Tabla 3
Matriz de Pugh

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)			
	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
Criterio 1				
Criterio 2				
Criterio 3				
Criterio 4				
Suma +				
Suma 0				
Suma -				
Evaluación neta				

Fuente: (Sejzer Raul, 2016)

De acuerdo con (Sejzer Raul, 2016) la mecánica es la siguiente:

Se toma la primera alternativa de diseño y se analiza criterio por criterio si su cumplimiento es superior al diseño actual, es inferior o es igual. Si es superior se coloca un signo "+", si es inferior un signo "-" y si es igual un "0". Una vez completada toda la tabla, se realiza la suma de cada columna. El concepto de diseño que obtenga un resultado mayor, producto del balance entre aspectos positivos y negativos, será la "mejor solución".

3.3 Morfología de Pneu-nets

Alternativa 1: Lento Pneu-net (SPN)

Estos sistemas consisten según los estudios de (Mosadegh, 2014) en general, de una capa superior extensible y una capa inferior inextensible pero flexible; a este tipo de estructura se le considera “lento pneu-net” (SPN); pero la abreviatura también puede referirse a “simple pneu-net”, ya que el diseño y fabricación de estos sistemas es ligeramente más simples que los que se describirá posteriormente.

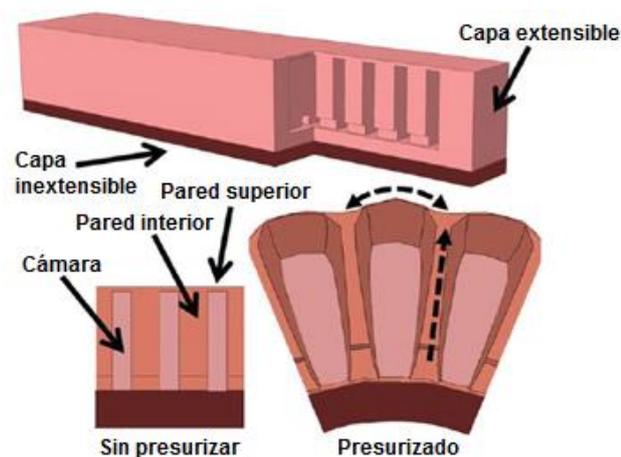


Figura 29 Representación esquemática de lento pneu-net (SPN)

Fuente: (Mosadegh, 2014)

En la figura 29, las flechas sólidas identifican regiones del actuador, las flechas segmentadas significan regiones en expansión cuando se presuriza. La capa extensible de un SPN contiene cámaras conectadas por un único canal que cuando se presuriza, preferentemente amplía la parte superior, y estira las paredes interiores de las cámaras. Este cambio de la forma resulta por la flexión de todo el actuador (debido a la diferencia entre la capa extensible y la capa inextensible). (Mosadegh, 2014)

El cambio máximo de volumen de los canales dentro de las pneu-net debido a la deformación del material elastomérico define la cantidad total de gas comprimido que debe ser transportado en él para lograr la flexión

completa; cambios más grandes en volumen requieren duraciones más largas de presurización para alcanzar el accionamiento completo. (Mosadegh, 2014)

Alternativa 2: Rápida Pneu-net (FPN)

Para reducir los cambios en el volumen requerido para el accionamiento completo, y por lo tanto para aumentar la velocidad de accionamiento, surge un nuevo actuador, el cual se denomina “rápida pneu-net” (FPN) como se indica en la figura 30, en la cual las flechas sólidas identifican regiones del actuador, las flechas segmentadas significan regiones en expansión cuando se presuriza. El FPN, como el SPN, se compone de una capa superior extensible y la parte inferior inextensible pero flexible. En contraste con el SPN, la capa extensible de la FPN contiene huecos entre las paredes interiores de cada cámara. (Mosadegh, 2014)

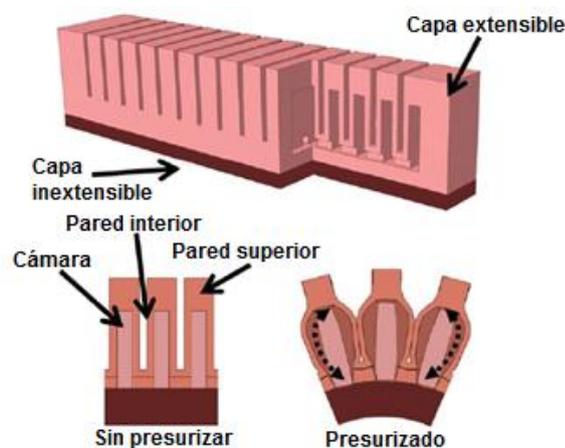


Figura 30 Representación esquemática de rápida pneu-net (SPN),

Fuente: (Mosadegh, 2014)

El diseño de las cámaras del FPN viene dado de tal manera que las dos paredes interiores son más delgadas, y tienen una mayor área de superficie, que las otras paredes exteriores. Un aumento en la presión interna, por lo tanto, se expande las paredes interiores, y minimiza la tensión que se produce en las otras paredes exteriores. Además, la estrecha proximidad de dos cámaras contiguas hace que las paredes interiores de expansión se

empujen uno contra el otro, y da como resultado un alargamiento preferencial de la capa extensible con sólo cambios pequeños en la altura de esta capa. (Mosadegh, 2014)

3.3.1 Criterios de selección de la morfología de los Pneu-net

Contando con los criterios de selección que se muestran en la tabla 4, Se procede a hallar la mejor alternativa de morfología para la elaboración del pneu-net.

Tabla 4
Criterios de selección de la morfología de los Pneu-net

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Facilidad en diseño	+	-
Cantidad de aire comprimido	-	+
Funcionalidad	-	+
Tiempo de accionamiento	-	+
Durabilidad	0	0
Rendimiento	-	+
Suma +	1	4
Suma 0	1	1
Suma -	4	1
Evaluación neta	-3	3

Los resultados de la tabla # 4, indica que la alternativa 2 cumple de mejor manera con los criterios establecidos para la selección de la morfología del actuador blando (Pneu-net), por lo tanto se optara por usar la morfología Rápida pneu-net (FPN) la cual es ideal debido a su rápido accionamiento, menor cantidad de aire comprimido, alta durabilidad y rendimiento.

3.4 Parámetros de diseño de FPN

Mediante la investigación realizada por (Mosadegh, 2014) determina que “El número, altura de las cámaras, y espesores de pared generan impacto en la flexión del FPN, también mayores cámaras para una longitud dada y dentro de las paredes más delgadas permitidas generan una mayor flexión a presiones más bajas”. Sin embargo, estas modificaciones en el diseño están

limitadas tanto por las propiedades de los materiales, y por la fabricación de las pneu-net. La resolución de la impresora 3D, que se utiliza para hacer los moldes determina el número de cámaras y el grosor de las paredes que pueden ser fabricados como se indica en la figura 31.

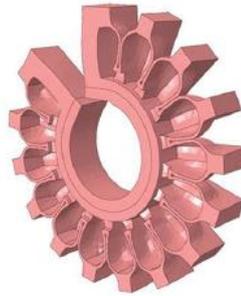


Figura 31 Estructura interna de FPN

Fuente: (Mosadegh, 2014)

El control del movimiento del actuador es otro importante parámetro que caracteriza el rendimiento. La FPN, tiene una curva de PV casi lineal; esta cuasi-linealidad debería permitir la predicción de movimiento mediante el control de la presión como se observa en la figura 32. Por consiguiente, el FPN tiene la ventaja de proporcionar una salida de complejo no lineal (es decir, un movimiento de flexión) con una simple entrada casi lineal (es decir, presión). (Mosadegh, 2014)

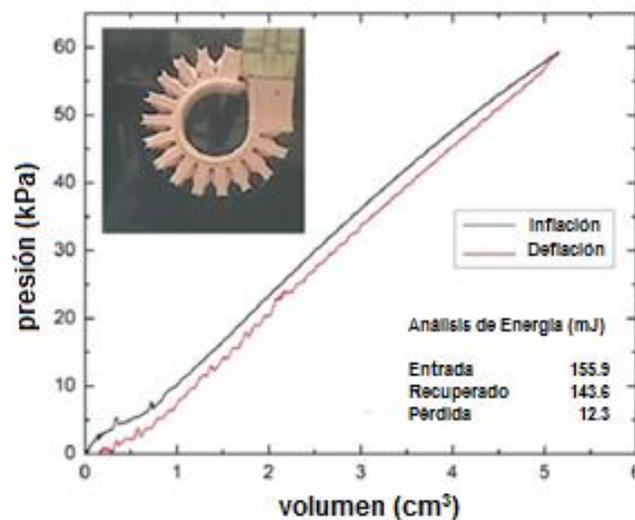


Figura 32 Curva PV de FPN

Fuente: (Mosadegh, 2014)

Los datos que se obtienen a partir de las gráficas de histéresis PV son:

- La presión de fluido requerida para el completo accionamiento
- El volumen de fluido requerido para el completo accionamiento
- La energía de entrada necesaria para la total flexión del actuador
- La energía que puede ser recuperada durante la despresurización
- La energía disipada durante un ciclo de accionamiento
- La forma (linealidad o el tipo de no linealidad) de la curva de PV.

Los valores máximos de los ejes x y el eje y significan la presión y el volumen requerido para la completa flexión del actuador. El área debajo de la curva de la inflación significa la energía de entrada del accionador. El área debajo de la curva de deflación significa la energía recuperada del actuador. (Mosadegh, 2014)

3.5 Análisis de fatiga de FPN

Una medida importante para el rendimiento de los actuadores elastoméricos es la vida útil del dispositivo en uso, la duración de la vida está limitada por la fatiga en el material y el desgaste en las uniones de las capas extensibles e inextensibles. Para ello (Mosadegh, 2014) “midió el número de ciclos de accionamiento completo (consistiendo cada ciclo en casi lleno flexión y relajante) que el actuador podría soportar antes de reventar”.

(Mosadegh, 2014) afirma que el FPN evita ambos modos de fallo (fallo interfacial y la ruptura de la capa extensible). Así pues, el FPN logra una vida útil más larga; el FPN no falla después de la actuación cíclica a 2Hz y a 10^6 ciclos de accionamiento completo. Se evalúa la fatiga del material mediante la medición de las curvas PV de histéresis, antes y después de someterlos a pruebas cíclicas.

Como se observa en la figura 33, las curvas PV no cambian sustancialmente durante los 10^6 ciclos, lo cual indica que el rendimiento de

la FPN se mantuvo. La ligera disminución de la pendiente, sin embargo, muestra que el actuador requiere menos presión, pero más volumen, para doblarse completamente; Por lo tanto, después de muchos ciclos de accionamiento, el material se extiende ligeramente más fácilmente que antes de la prueba cíclica, posiblemente debido a la tensión de las cadenas poliméricas en el elastómero. (Mosadegh, 2014)

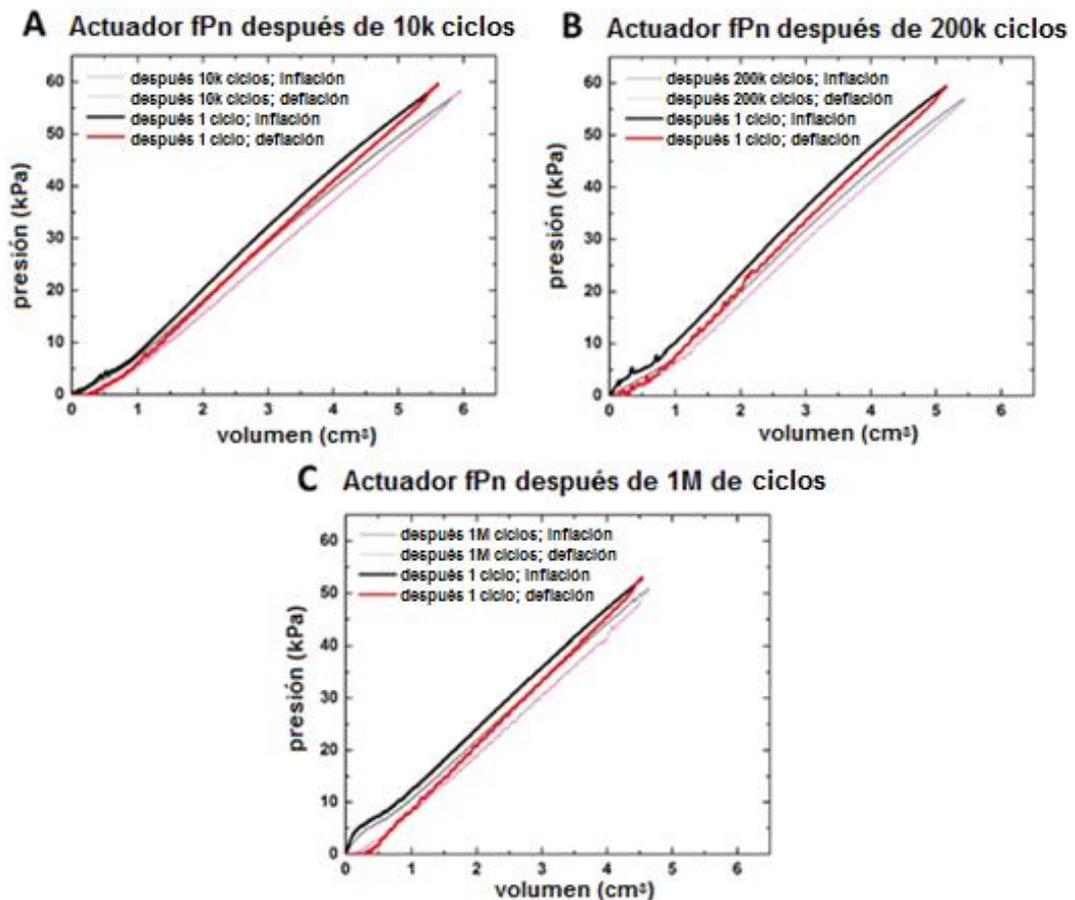


Figura 33 Curvas de presión-volumen de histéresis para actuadores FPN antes y después de accionamiento neumático repetido

Fuente: (Mosadegh, 2014)

3.6 Materiales de construcción de los Pneu-net

En base a los estudios realizados por (Mosadegh, 2014) sugiere el uso de cauchos de silicona para la fabricación de los pneu-net. Entonces (Wacker Chemie, 2017) define a los cauchos de silicona de la siguiente manera:

Los cauchos de silicona consisten esencialmente en polímeros de silicona y cargas. Se someten a vulcanización a alta temperatura o a temperatura ambiente con reactivos adecuados, durante los cuales el compuesto no curado en estado plástico se transforma en un caucho elastomérico con una estructura tridimensional. Los cauchos de silicona son resistentes al calor, a bajas temperaturas flexibles y resistentes al envejecimiento (UV, ozono y radiación). Son fáciles de procesar y tienen buenas propiedades mecánicas que permanecen inalteradas en un amplio rango de temperatura. También son fiables y compatibles con el medio ambiente.

Alternativa 1: Elastosil M4601

Mostrado en la figura 34, este elastómero según (Wacker Chemie, 2017) se define de la siguiente manera:

Los productos de silicona ELASTOSIL, con su gama universal de propiedades, se utilizan en las más variadas aplicaciones industriales y de construcción. Su potencial casi ilimitado las hace ideales para aplicaciones en casi todas las industrias, tales como automoción y mecánica, electrónica y electricidad, textiles, artículos para bebés, juguetes, electrodomésticos y artículos deportivos, y como selladores en la industria de la construcción.



Figura 34 Elastosil M4601

Fuente: (Interfareba, 2017)

Las características principales en base a (Interfareba, 2017) tenemos:

- Excelente flujo
- Curado rápido y sin contracción a temperatura ambiente. El curado se puede acelerar considerablemente mediante la aplicación de calor
- Dureza baja (Shore A aprox. 28)
- Elevada resistencia al desgarro

Alternativa 2: Ecoflex 30

Los cauchos Ecoflex son siliconas catalíticas platinadas que son versátiles y fáciles de usar. Los cauchos Ecoflex se mezclan 1A:1B en peso o en volumen y se curan a temperatura ambiente con un encogimiento insignificante como se muestra en la figura 35. La baja viscosidad garantiza un fácil mezclado y desairado. (“Ecoflex® 00-30 Product Information”, 2017)

Las características principales en base a (Interfareba, 2017) tenemos:

El caucho curado es muy suave, muy fuerte y muy "elástico", estirando muchas veces su tamaño original sin rasgar y rebotará a su forma original sin distorsión. Los cauchos Ecoflex actualmente están disponibles en cuatro diferentes durezas: Shore A-5, Shore 00-10, 00-20, 00-30 y 00-50. Son adecuados para una variedad de aplicaciones, incluyendo la fabricación de aparatos protésicos, amortiguación para órtesis y aplicaciones de efectos especiales (especialmente en animatronics donde se requiere movimiento repetitivo).



Figura 35 Ecoflex 30

Fuente: (“Ecoflex® 00-30 Product Information”, 2017)

3.6.1 Criterios de selección de materiales de construcción Pneu-net

Contando con los criterios de selección descritos en la tabla 5, se procede a hallar la mejor alternativa en materiales de construcción del pneu-net.

Tabla 5
Criterios de selección de materiales de construcción Pneu-net

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Tiempo de curado	+	-
Encogimiento	0	0
Dureza	+	-
Rendimiento	+	-
Durabilidad	+	-
Aplicabilidad	+	-
Suma +	5	0
Suma 0	1	1
Suma -	0	5
Evaluación neta	5	-5

Los resultados de la tabla # 5 indica que la alternativa 1 cumple de mejor manera con los criterios establecidos para la selección del material de construcción del actuador blando (Pneu-net), por lo tanto se optara por usar silicona de caucho Elastosil la cual es ideal debido a su rápido tiempo de curado, nulo encogimiento, alta durabilidad y rendimiento, y lo más importante este elastómero es ideal para aplicaciones industriales.

3.7 Diseño del actuador blando

Debido a los parámetros expuestos anteriormente respecto a la morfología del actuador, se optó por realizar los Pneu-net FPN, debido a sus grandes propiedades que presenta, como es su completo accionamiento circular con presiones de aire menores, además de su fácil modificación de parámetros de diseño y adaptación a aplicaciones de manipulación de objetos con forma irregular. Para ello se diseñó el siguiente actuador mediante un software asistido por computador.

3.7.1 Diseño de capa superior extensible

En la figura 36, se muestra la capa extensible del actuador la cual consta de 10 cámaras para que facilite la flexión total del actuador con el menor consumo de aire. Su terminación es redonda debido a la aplicación destinada del mismo, el cual es recoger objetos de geometrías irregulares.

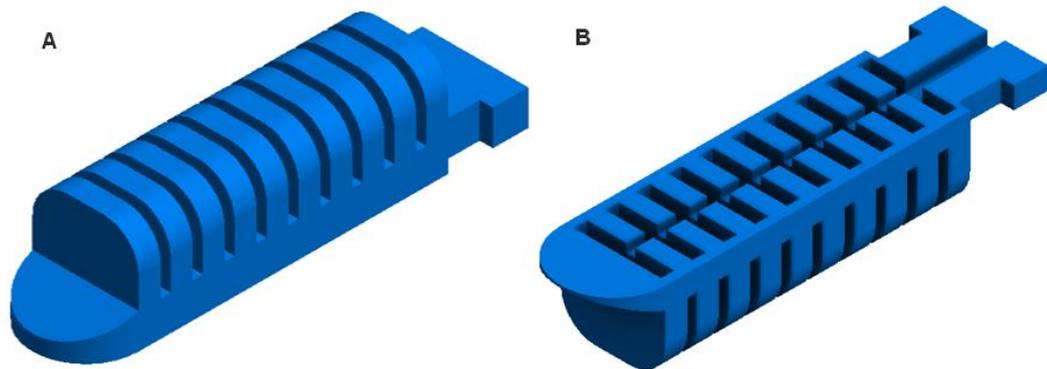


Figura 36 A) Capa superior extensible, B) Entradas de Capa superior extensible

3.7.2 Diseño de moldes para capa superior extensible

Para la obtención del actuador blando mostrado, es necesario realizar un molde que contenga la forma descrita con anterioridad como se muestra en las figuras 37 y 38, para posteriormente depositar el elastómero y obtener el actuador deseado.

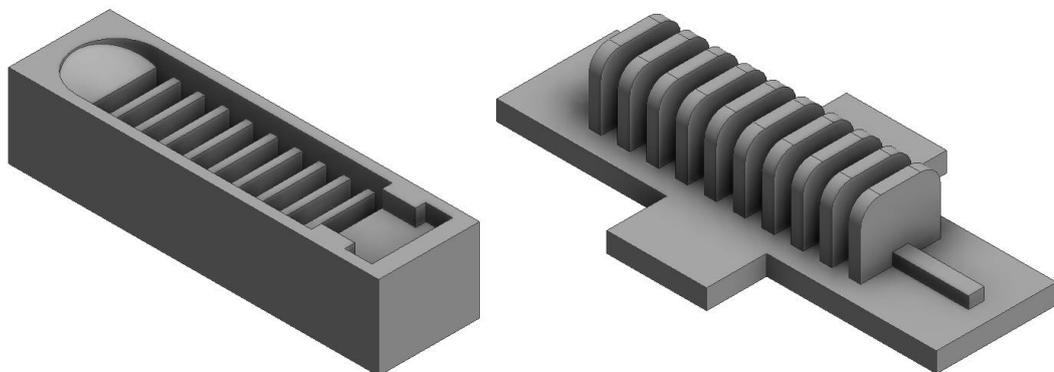


Figura 37 Moldes para capa superior extensible

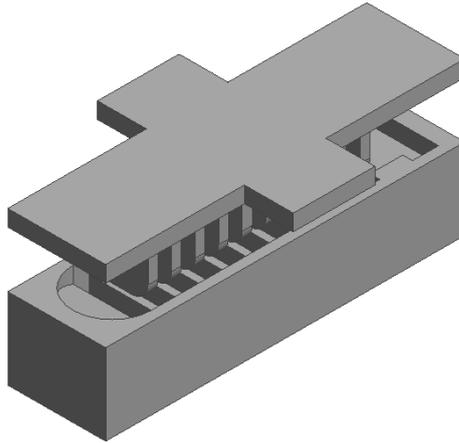


Figura 38 Ensamble de molde para obtención del actuador blando

3.7.3 Diseño de capa inferior flexible

En la figura 39, se muestra la capa inferior flexible del actuador cuya función es sellarse con la capa superior, debido a ello esta posee una forma similar con la capa superior. Además contiene unas pequeñas entradas las cuales facilitan la sujeción de los objetos irregulares.

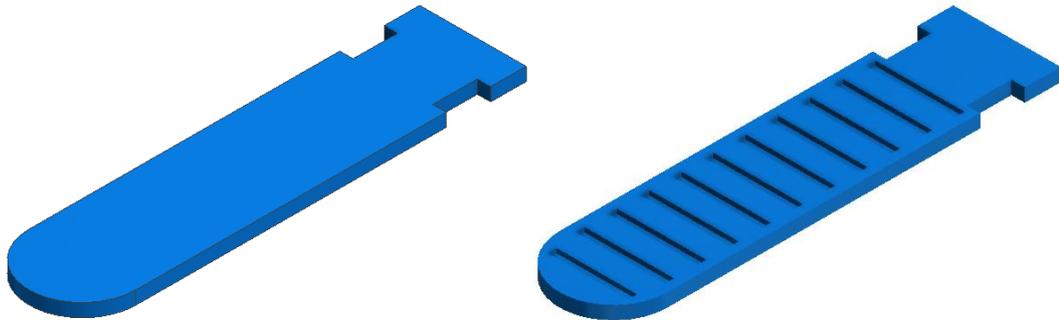


Figura 39 Capa inferior flexible

3.7.4 Diseño del molde de la capa inferior flexible

De igual manera es necesario la creación de un molde para obtener la capa inferior del actuador blando como se observa en la figura 40.

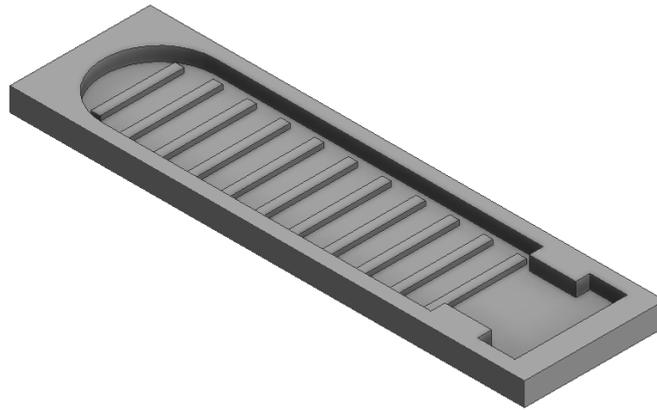


Figura 40 Molde de la capa inferior flexible

3.7.5 Ensamble del actuador blando

En la figura 41, se muestra la correcta union entre las capas superior e inferior del actuador blando, obteniendo asi el actuador completo.

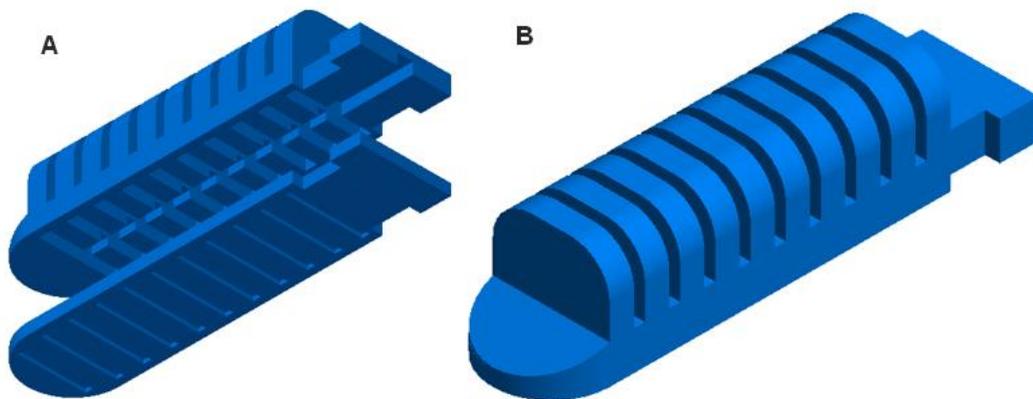


Figura 41 A) Ubicación de capas del actuador, B) Ensamble final de actuador blando

En la figura 42, se muestra una vista en corte del actuador en el cual se observan las cámaras internas donde ingresa el aire presurizado el cual genera el movimiento del actuador blando.

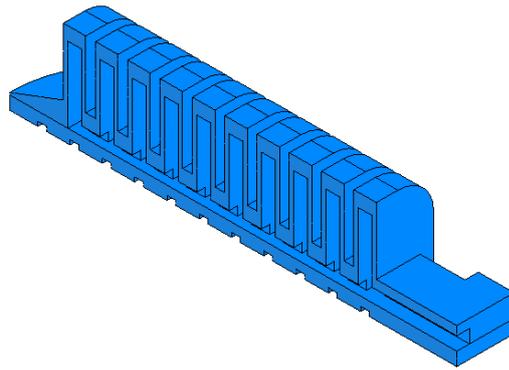


Figura 42 Cámaras internas del actuador blando

NOTA: El procedimiento de construcción detallada del actuador se presenta en el siguiente capítulo.

3.8 Análisis dinámico del actuador blando

El análisis dinámico del actuador blando se realizara con la ayuda de un software de simulación el cual permite simular el comportamiento del actuador cuando es inyectado aire a una presión de 2 bares. El resultado de dicha acción se muestra en la figura 43.

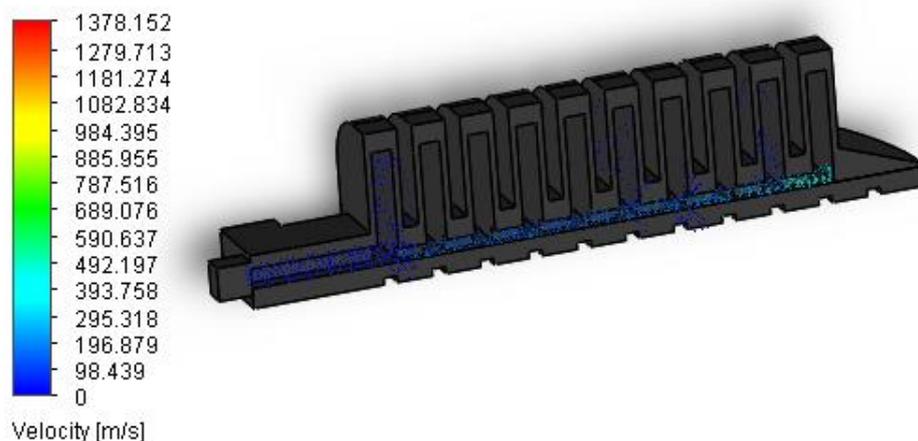


Figura 43 Análisis dinámico de inyección del fluido en el actuador

Como se observa el aire es inyectado por la parte posterior del actuador y el fluido recorre por el interior del mismo a una velocidad promedio de 295

m/s haciendo que el comportamiento del actuador sea eficiente al momento de ser activado y manipular los objetos.

Además se realiza un análisis para determinar el peso máximo que los actuadores podrán manipular para lo cual se toma como referencia la carga máxima que puede soportar el brazo robótico que es 3 Kg, lo cual da una fuerza total de 29,43 N la cual se distribuye uniformemente a los cuatro actuadores dando una fuerza promedio de 7 N. El resultado del análisis se puede observar en las figuras 44 y 45.

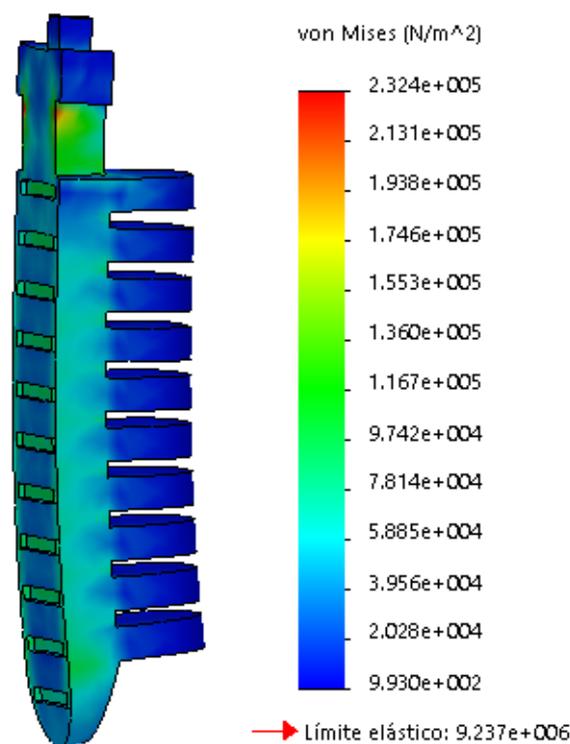


Figura 44 Análisis de Von Misses

De acuerdo a los resultados mostrados se puede determinar que el actuador se encuentra bien diseñado y es óptimo para acoplarse al trabajo que realiza el brazo robótico ya que este resistirá sin problema el peso permitido por el brazo.

En cuanto al análisis del desplazamiento que tendrá el actuador se encuentra solo una pequeña zona crítica pero debido a que el material es hiperelástico este no se deformara y podrá trabajar de manera adecuada.

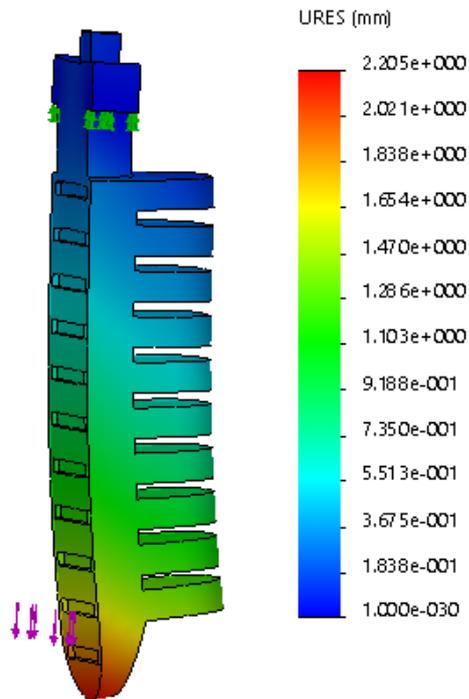


Figura 45 Análisis de desplazamientos

3.9 Diseño mecánico de la pinza flexible

Una vez definido el diseño del actuador blando se procede a diseñar la estructura de la pinza flexible, para ello es necesario tener presente ciertos parámetros como son el peso que tendrá toda la pinza flexible debido a que será implementado en el brazo robótico Mitsubishi RV-2SDB, además de las dimensiones y adaptabilidad.

3.9.1 Materiales de construcción de componentes

La construcción de las partes mecánicas y los moldes de la pinza flexible se procederá a realizar mediante impresión 3D, se tiene como opción dos tipos de materiales para la impresión, como primera alternativa se tiene acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) como se muestra en la figura 46, y como segunda alternativa se tiene ácido poliláctico (PLA) representado en la figura 47. Para seleccionar el mejor de estos materiales se utilizara como herramienta la matriz de Pugh con la cual se destacara y comparara cada

una de las propiedades de estos materiales y se obtendrá el más adecuado para que estas piezas sean estructuralmente útiles.

Alternativa 1: Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Este termoplástico según (Rojas, 2011) lo define de la siguiente manera.

Plástico de ingeniería, debido a su elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes. Los materiales de ABS tienen importantes propiedades como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado. La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor. El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes.

- El acrilonitrilo proporciona: Resistencia térmica, Resistencia química, Resistencia a la fatiga, Dureza y rigidez.
- El butadieno proporciona: Ductilidad a baja temperatura, Resistencia al impacto, Resistencia a la fusión.
- El estireno proporciona: Facilidad de procesado (fluidez), Brillo, Dureza y rigidez



Figura 46 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Fuente: (Rojas, 2011)

Alternativa 2: Ácido poliláctico (PLA)

Este biopolímero según (Jijon, 2009) es un termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino. Este plástico biodegradable procede de maíz o patata. Debido a esto este plástico con el pasar del tiempo ira perdiendo sus propiedades iniciales hasta descomponerse en sus elementos químicos simples. Es reciclable, esto quiere decir que es posible su reutilización después de un proceso de tratamiento adecuado. No necesita plataforma caliente, aunque en raras ocasiones puede producirse pandeo durante el proceso de enfriamiento.



Figura 47 Ácido Popiláctico (PLA)

Fuente: Jijon, 2009

3.9.2 Criterios de selección de materiales de construcción del sujetador

Contando con los criterios de selección descritos en la tabla 6, se procede a hallar la mejor alternativa en materiales de construcción del sujetador.

Tabla 6

Criterios de selección de materiales de construcción del sujetador

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Resistencia al impacto	+	-

CONTINÚA →

Acabado	+	-
Dureza	+	-
Temperatura	0	0
Durabilidad	+	-
Suma +	5	1
Suma 0	1	1
Suma -	0	4
Evaluación neta	5	-3

Los resultados de la tabla # 6 indica que la alternativa 1 cumple de mejor manera con los criterios establecidos para la selección del material de construcción de los componentes mecánicos y moldes de la pinza flexible, por lo tanto se opta por usar acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) para la impresión de todas las piezas, ya que este permite un mejor acabado y tiene una mayor durabilidad por lo que es conocido como un plástico de ingeniería.

3.9.3 Diseño de pieza soporte

Entonces se procede con el diseño del soporte, pieza importante la cual va a ser insertada en el brazo robótico y además sujetara a los actuadores blandos. En la figura 48 se muestra la parte superior del soporte en la cual se insertara al brazo robótico con presencia de agujeros en los cuales atravesarán las tuberías de aire para presurizar al actuador blando. Además se muestra la parte inferior del soporte en el cual se insertan los demás componentes que sostendrán a los actuadores blandos.

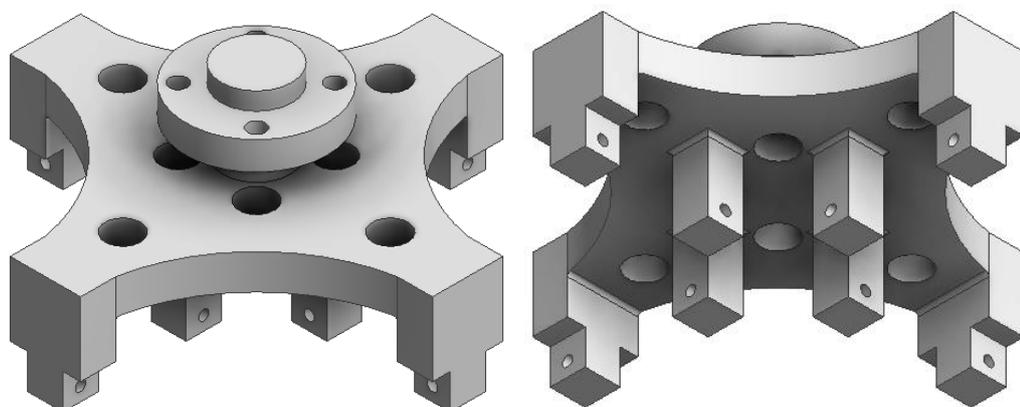


Figura 48 Diseño CAD de pieza soporte

3.9.4 Diseño de pieza Fijador

Pieza importante como se observa en la figura 49 la cual está encargada de sujetar al actuador blando para posteriormente ser implementada en el soporte.

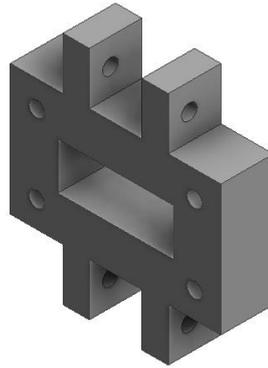


Figura 49 Diseño CAD de pieza fijador

3.9.5 Diseño de pieza Inserción de aire

Mediante esta pieza se produce el ingreso de aire al actuador mediante su agujero central en el cual será insertado la tubería hasta llegar al actuador, procurando que no existan filtraciones o algún otro error que provocaría fugas de aire como se observa en la figura 50. La pieza se ensambla a continuación del fijador.

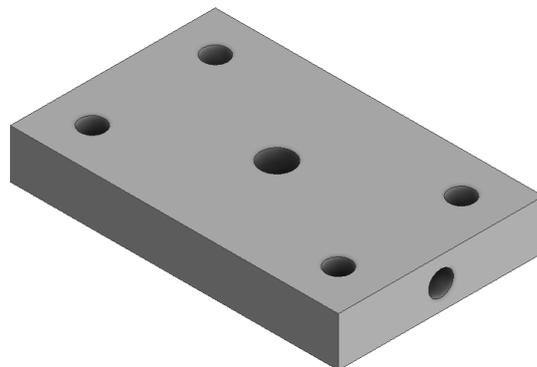


Figura 50 Diseño CAD de pieza Inserción de aire

3.9.6 Ensamble del actuador y gripper

En la figura 51 se muestra la manera en la cual debe ser ensamblado el actuador blando al fijador e inserción de aire para posteriormente ser sujetado al soporte.

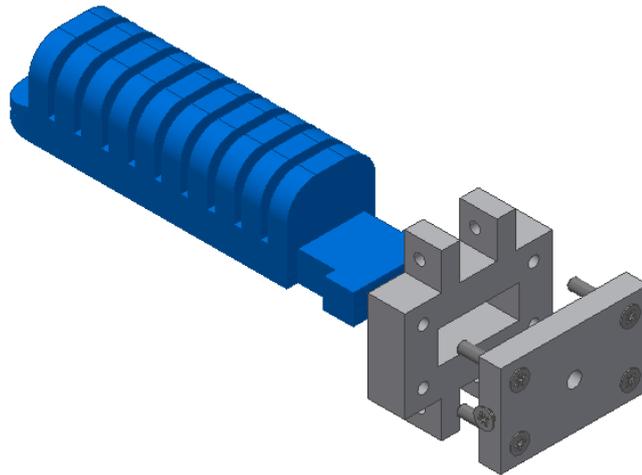


Figura 51 Ensamble de actuador blando - fijador - inserción de aire

A continuación se muestra la unión de los cuatro actuadores con el soporte, fijador e inserción de aire obteniendo la pinza flexible que se muestra en la figura 52.



Figura 52 Ensamble final de gripper

3.10 Análisis estático del sujetador

En el análisis estático del sujetador se debe concentrar en dos piezas, en las cuales se fijan los actuadores y por ende son los elementos que soportaran todo el peso, además se debe evaluar a estos componente para saber si soportaran el peso admitido por el brazo que es de 3 Kg, constituyendo una carga total de 29,43 N la cual se distribuye en los 8 acoples del mismo.

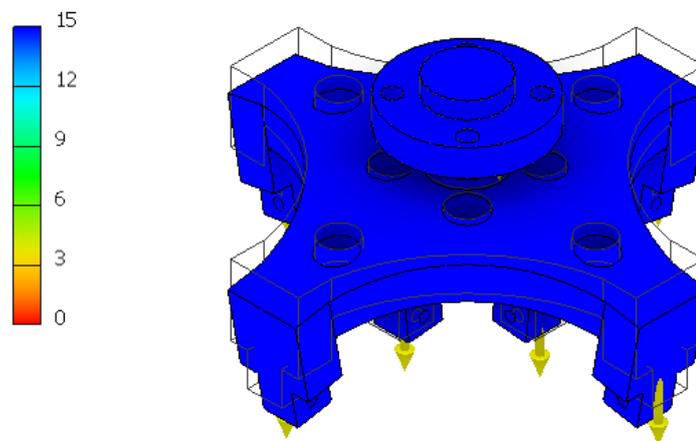


Figura 53 Análisis del factor de seguridad

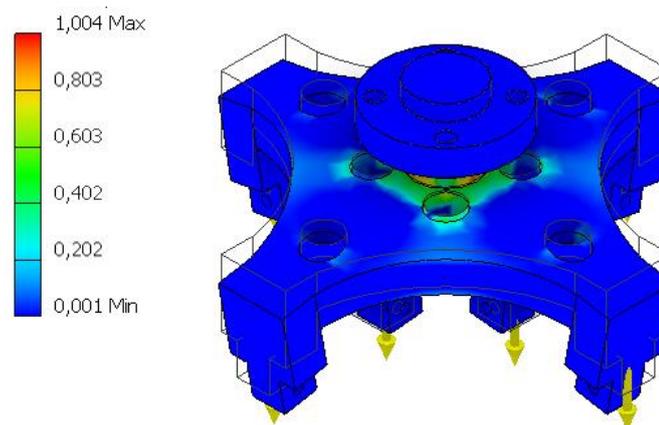


Figura 54 Análisis estático de la base del sujetador

Como se puede observar en las figuras 53 y 54 la base es capaz de soportar el peso admitido por el brazo robótico y mantiene en toda su

estructura un factor de seguridad de 15, por lo cual este se podrá acoplar y trabajar de forma ideal junto con el brazo.

La segunda pieza a analizar es el fijador en la cual se sujeta el actuador y mediante esta se puede acoplar todo el sistema mediante tornillos, por lo cual esta debe soportar los mismos 3 Kg y por lo tanto la carga es la misma que en la base y se distribuye en 8 puntos y los resultados tanto del factor de seguridad como el esfuerzo de Von Mises se muestran en las figuras 55 y 56 respectivamente.

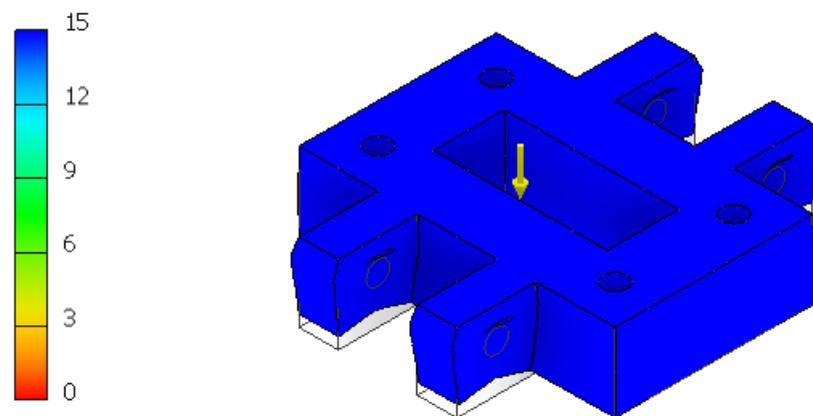


Figura 55 Análisis del factor de seguridad

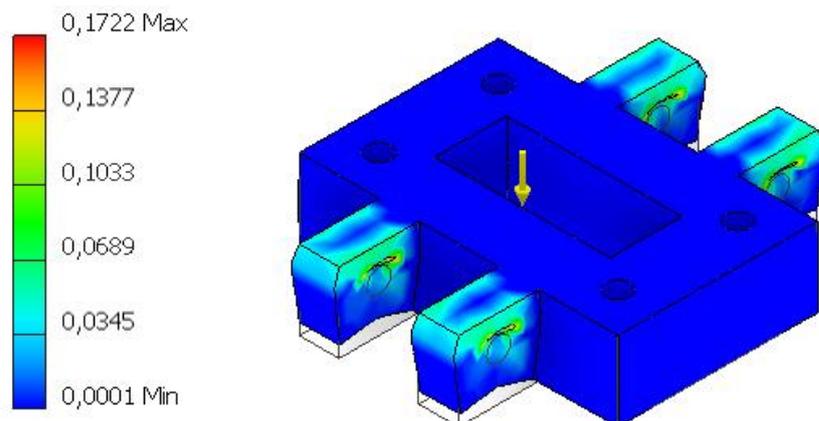


Figura 56 Análisis estático del sujetador

3.11 Ensamble final

El ensamble total del actuador blando finaliza al adaptarlo al brazo robótico como se observa en la figura 57. Los planos de cada pieza realizada esta detallados en los ANEXOS A y B.

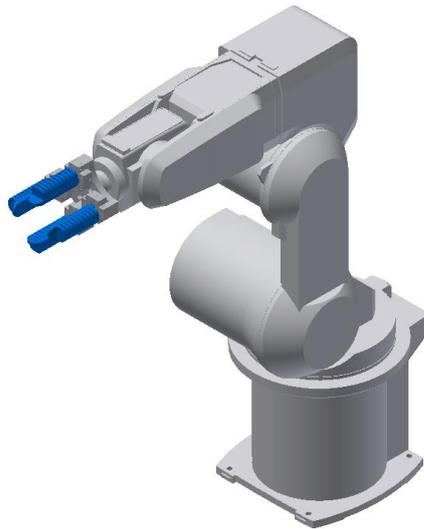


Figura 57 Ensamble final gripper - brazo robótico

3.12 Sistema de control del actuador blando

Cabe recalcar que el actuador blando será implementado en la Estación 6: Robot de FESTO el cual se indica en la figura 58. La estación se encuentra en el laboratorio de Mecatrónica de la institución. Entonces el control del actuador viene dado por la estación. El actuador blando necesita presión de aire para su activación para ello la estación cuenta con un compresor de aire y una unidad de mantenimiento los cuales proveerán de aire para su activación.



Figura 58 Estación Robot

Fuente: (FESTO, 2006)

El control del flujo de aire se realiza mediante una válvula solenoide CPE10-M1H-5/3G-QS-4 que se muestra en la figura 59. De acuerdo con (FESTO, 2003) se indica las características más importantes de la misma:

- Alimentación de 24 V DC
- Válvula de 5 vías y 3 posiciones con el centro cerrado
- Presión de operación mínima 3 bar
- Presión de operación máxima 8 bar

La característica más importante es que la válvula posee el centro cerrado lo cual mantiene la presión de aire en el actuador.



Figura 59 Válvula solenoide CPE10-M1H-5/3G-QS-4

Fuente: (FESTO, 2003b)

Como se mencionó en capítulos anteriores, debido a la garantía de la estación, no se optó por manipular el firmware del brazo robótico por lo cual la función del actuador blando conjunto con el brazo robótico es únicamente la de manipular los objetos irregulares presentes. Para ello se realiza un programa que cumpla con esta función. La programación del brazo robótico se la realiza directamente desde la botonera de mando, en la figura 60, se indica el procedimiento a seguir para realizar la programación en el robot.

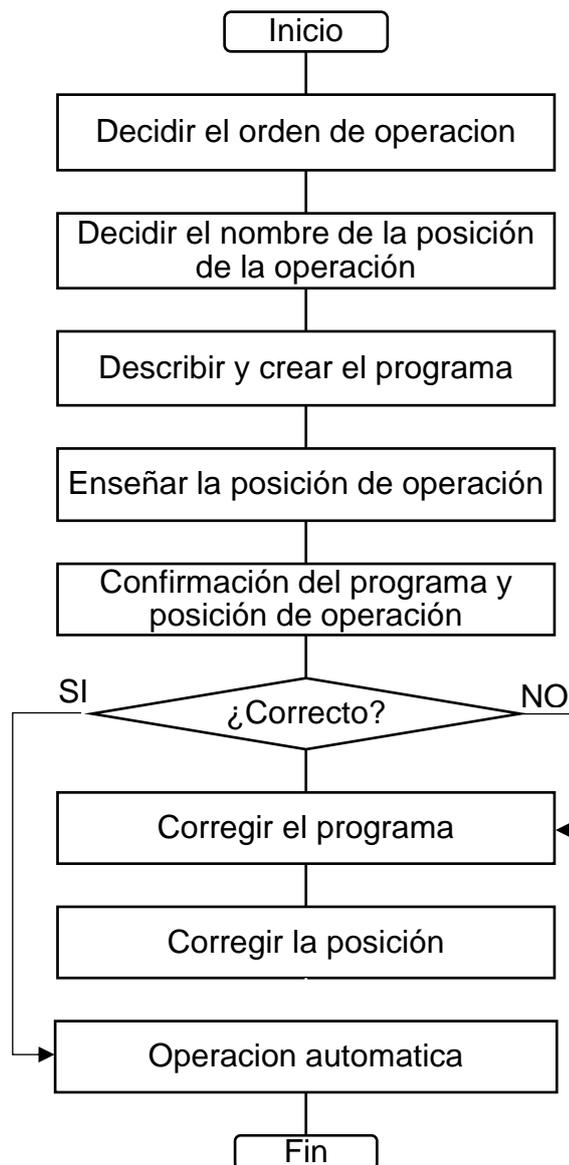


Figura 60 Diagrama de flujo programación robot

A continuación se describe de manera más amplia lo escrito en el flujograma de acuerdo con (FESTO, 2017) tenemos:

- Decidir el orden de operación del robot, la trayectoria de operación y el trabajo en cada posición de operación (actuador abierto).
- Enseñar la posición de operación del robot en las variables de posición. Decidir el nombre de la variable de posición.
- Con base en el orden de operación establecido y el nombre de la posición de operación, convertir las operaciones del robot y trabajo en comandos. Describir los comandos del programa y guardar en el controlador.
- Mover el robot a cada posición de operación con operación de desplazamiento y enseñar cada posición en las variables de posición.
- Ejecutar el programa guardado en el controlador línea por línea y confirmar que el programa y las posiciones de operación se guardan correctamente.
- Si se detectaron errores en la operación del robot o durante la confirmación del programa, corrija el programa.
- Si se detectaron errores en la posición de operación del robot durante la confirmación del programa, corrija la posición enseñada
- Ejecutar automáticamente el programa completado.

3.13 Creación del programa

El robot realizara la manipulación de los objetos de geometría irregular desde su almacenamiento hacia el depósito para su clasificación como se muestra en la figura 61. Para ello se establece los pasos a seguir para cumplir con dicha función

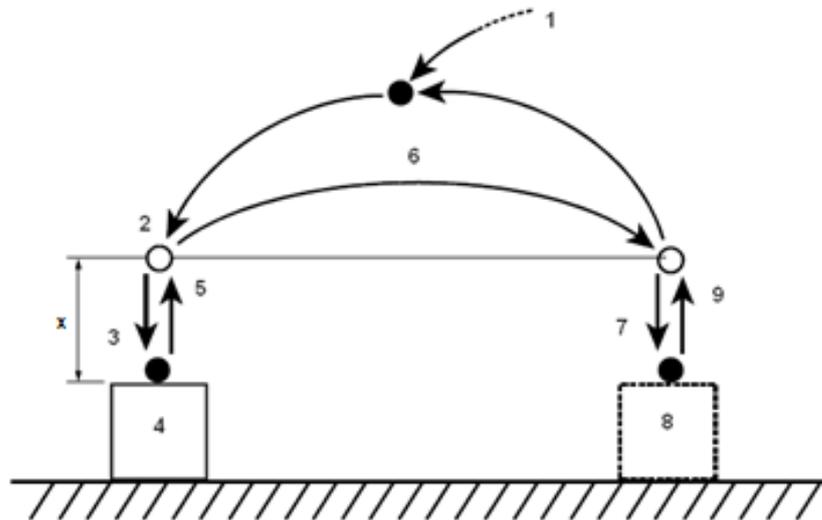


Figura 61 Representación gráfica de programación de robot

Fuente: (FESTO, 2017)

Inicio:

- Mover a la posición inicial
- Mover a la posición para agarrar la pieza de trabajo
- Mover una distancia x hacia abajo acercándose a la pieza de trabajo.
- Sujetar la pieza de trabajo (cerrar actuador blando).
- Mover hacia arriba.
- Desplazarse hacia el lugar dispuesto para liberar la pieza de trabajo.
- Mover a la posición para liberar la pieza de trabajo
- Soltar la pieza de trabajo (abrir actuador blando).
- Mover hacia arriba.
- Mover a la posición inicial

Fin:

En la tabla 7, se describe los comandos necesarios para programar al robot para que realice la función de manipulación de objetos.

Tabla 7
Comandos y explicación programación robot

Operación de destino y trabajo	Comando	Ejemplo de designación
Movimiento de la articulación	Mov	Mover a la posición Mov

CONTINÚA →

Abrir actuador blando	Hopen	Abrir actuador	Hopen 1
Cerrar actuador blando	Hclose	Cerrar actuador	Hclose 1
Esperar	Dly	Esperar 1 segundo	Dly 1.0
Fin	End	Fin del programa	End

Nota: En el anexo C se encuentra la programación del robot.

3.14 Diseño del módulo clasificador de objetos

Diseñado con el fin de cumplir con la clasificación de objetos, el módulo recibirá los objetos del brazo robótico para proceder a clasificarlos, este módulo es didáctico por tal razón su diseño se asemeja a la estación robot del laboratorio y su funcionamiento es solo para piezas pequeñas. El modulo consta de partes mecánicas, electrónicas y visión artificial. El módulo se construirá con un material metálico, para lo cual se tiene dos alternativas de materiales las cuales son: acero laminado en frío y aluminio.

Alternativa 1: Acero laminado en frío

El acero laminado en frío para (Aceros, 2017) es en esencia laminado en caliente con un mayor procesamiento. El acero es enfriado a temperatura ambiente y luego es recocido o laminado templado. Este proceso producirá acero con tolerancias dimensionales más próximas y un rango más amplio de superficies de acabado. El término laminado en frío es utilizado erróneamente en todos los productos, cuando en realidad el nombre del producto se refiere al laminado de planchas y de productos en rollos. Este proceso proporciona al acero altos límites de elasticidad y tiene cuatro principales ventajas:

- El estirado en frío incrementa la resistencia tensil y de elasticidad, que con frecuencia elimina mayores tratamientos térmicos costosos.
- El cilindrado elimina las imperfecciones en la superficie.

- El rectificado reduce el rango de tolerancia del tamaño original.
- El pulido mejora el acabado de la superficie.

Los aceros laminados en frío proporcionan un mejor acabado en la superficie y poseen mayor tolerancia, concentricidad y rectitud que los laminados en caliente. (Aceros, 2017)

Alternativa 2: Aluminio

La lámina de aluminio según (ALMEXA, 2015) tiene como características principales su excelente resistencia a la corrosión y ductilidad. Es usado en la mayoría de aplicaciones. Este producto tiene diferentes presentaciones como: lámina de aluminio lisa, lámina de aluminio en hoja, lámina natural de aluminio, lamina de aluminio pintada , lamina de aluminio en rollo y lamina de aluminio en cinta.

3.14.1 Criterios de selección de materiales de construcción del módulo

Contando con los criterios descritos en la tabla 8, se procede a hallar la mejor alternativa en materiales de construcción del módulo.

Tabla 8
Criterios de selección de materiales de construcción del módulo

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Resistencia al impacto	+	-
Acabado	+	+
Dureza	+	-
Costo	+	-
Durabilidad	0	0
Aplicabilidad	+	+
Suma +	5	2
Suma 0	1	1
Suma -	0	3
Evaluación neta	5	-1

Los resultados de la tabla # 8 indica que la alternativa 1 cumple de mejor manera con los criterios establecidos para la selección del material de

construcción del módulo, por lo tanto se optara por usar acero laminado en frio, ya que este permite un mejor acabado y tiene una mayor dureza y el costo es beneficioso para dicha fabricación.

3.15 Diseño mecánico

La clasificación de un objeto consiste en asignarlo a una clase con características específicas y predeterminadas por el usuario, como pueden ser el color de sus píxeles, su textura o su tamaño. Para poder clasificar objetos es necesario definir las fronteras entre las diferentes clases.

Los clasificadores se usan para:

- Segmentación de imágenes (por color, textura, etc.)
- Reconocimiento de objetos
- Control de calidad
- Detección de novedad (novelty detection), para detectar cambios o defectos en los objetos.
- Reconocimiento óptico de caracteres

En la tabla 9 se realiza una comparación entre los distintos modos de operación del módulo clasificador.

Tabla 9
Criterios de selección de clasificador

Criterios de selección	Conceptos			
	Por rodillos	Por gravedad	Por diámetro (Banda transportadora)	Brazo robótico
Facilidad de uso	+	+	+	-
Velocidad	+	-	-	-
Cantidad de productos	-	+	-	+
Movilidad	-	+	-	-
Mantenimiento	-	+	-	-
Costo	-	+	+	-
Suma +	2	5	2	1
Suma 0	0	0	0	0

CONTINÚA →

Suma -	4	1	4	5
Evaluación neta	-2	4	-2	-4

De acuerdo a las necesidades que se presentan en el proyecto es factible utilizar un sistema mecánico de clasificación por gravedad como se observa en la figura 62, el cual trabajara conjuntamente con un sistema de visión artificial encargado de reconocer los objetos, para ser clasificados en su respectiva clase mediante el reconocimiento del color que estos posean.

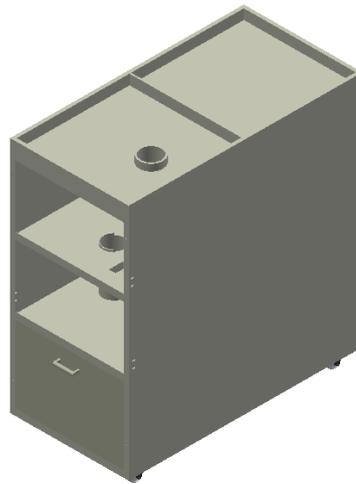


Figura 62 Módulo clasificador por gravedad

3.15.1 Diseño de paleta de empuje

Pieza importante ubicada en el nivel dos del módulo encargada de retirar el objeto luego de su clasificación como se observa en la figura 63. Su diseño es simple y de manera circular en el extremo.



Figura 63 Diseño CAD – paleta de empuje

3.15.2 Diseño de plato giratorio

Pieza ubicada en el nivel tres del módulo clasificador, encargada de almacenar los distintos objetos después de su clasificación. Cabe recalcar que es un módulo didáctico por lo cual se clasificara y almacenara piezas pequeñas, por tal razón el diseño del plato giratorio, el cual contiene cinco estantes para almacenar los objetos clasificados como se muestra en la figura 64.

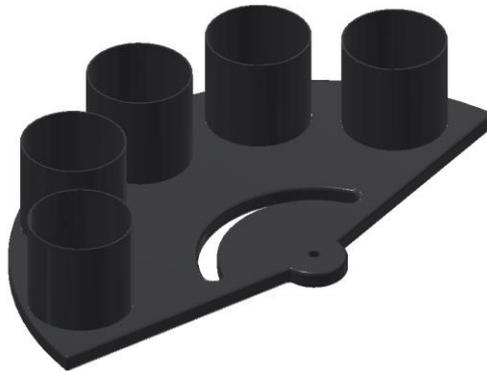


Figura 64 Diseño CAD de plato giratorio

Las piezas paleta de empuje y plato giratorio, serán fabricadas mediante impresión 3D, usando material acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), debido a las altas prestaciones descritas con anterioridad.

3.16 Actuadores

En el módulo clasificador es necesario el movimiento de piezas que intervienen en la clasificación de los objetos, para ello se tomaran en cuenta dos tipos de actuadores DC debido a la disponibilidad en el mercado ecuatoriano.

3.16.1 Alternativas de selección de actuadores

En esta sección se mostrarán características principales de dos tipos de actuadores como son:

- Servomotores DC
- Motores a pasos

Alternativa 1: Servomotores DC

Como se muestra en la figura 65, “Un servomotor es un tipo especial de motor que permite controlar la posición del eje en un momento dado. Está diseñado para moverse determinada cantidad de grados y luego mantenerse fijo en una posición” (Tecnología, 2017).

En base al estudio realizado por (Tecnología, 2017) las características principales de un servomotor son el par y la velocidad.

- **El par:** fuerza que es capaz de hacer en su eje, también llamado torque. Se suele expresar en Kg/cm, y mientras mayor es el par mayor corriente de consumo.
- **Velocidad:** velocidad angular o de rotación.



Figura 65 Servomotores DC

Fuente: (“MG996R High Torque Metal Gear Servo Motor”, 2017)

Alternativa 2: Motor a pasos

“Es un dispositivo electromagnético que convierte impulsos eléctricos en movimientos mecánicos de rotación. La principal característica de estos

motores es que se mueven un paso por cada impulso que reciben” (García, 2013).

El motor a pasos, observar figura 66, posee mucha precisión, lo cual le permite quedar fijo en una posición (como un servomotor) y también es capaz de girar libremente en un sentido u otro (como un motor DC). (García, 2013)



Figura 66 Motor a pasos

Fuente: (García, 2013)

3.16.2 Criterios de selección de actuadores

En base a los criterios descritos en la tabla 10, se procede a hallar la mejor alternativa en actuadores para el modulo

Tabla 10
Criterios de selección de actuadores

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Implementación	+	-
Costo	+	-
Disponibilidad	+	-
Precisión	-	+
Velocidad	0	0
Torque	0	0
Suma +	3	1
Suma 0	2	2
Suma -	1	3
Evaluación neta	2	-2

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 10, la alternativa 1 es la mejor opción para la implementación de los actuadores en el módulo de clasificación, siendo esta usar servomotores DC.

3.17 Ensamble total del módulo clasificador de objetos y explicación

El modulo está conformado por tres niveles como se observa en la figura 67. Entonces los objetos a clasificar se encuentran en la parte superior los cuales serán transportadas por el brazo robótico gracias al actuador blando, el brazo los depositara en el orificio y procede la clasificación.

En el segundo nivel se encuentra la cámara la cual realiza la clasificación por color de los objetos y una vez identificado el color comanda el servomotor presente en el nivel tres el cual se colocara en la posición adecuada, al finalizar el objeto es enviado hacia la mesa giratoria mediante otro servomotor presente en el nivel dos. En el cuarto nivel del clasificador se encuentra un almacenamiento de piezas y repuestos del actuador blando.

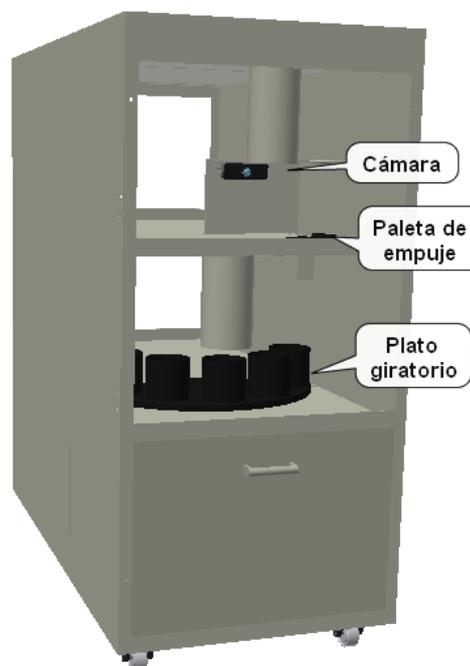


Figura 67 Ensamble total del módulo clasificador de objetos

3.18 Diseño electrónico

En esta fase se establece el diseño electrónico y control de los elementos electrónicos presentes en el módulo de clasificación. Para ello se establece el siguiente flujograma el cual describe la funcionalidad del módulo clasificador mostrado en la figura 68.

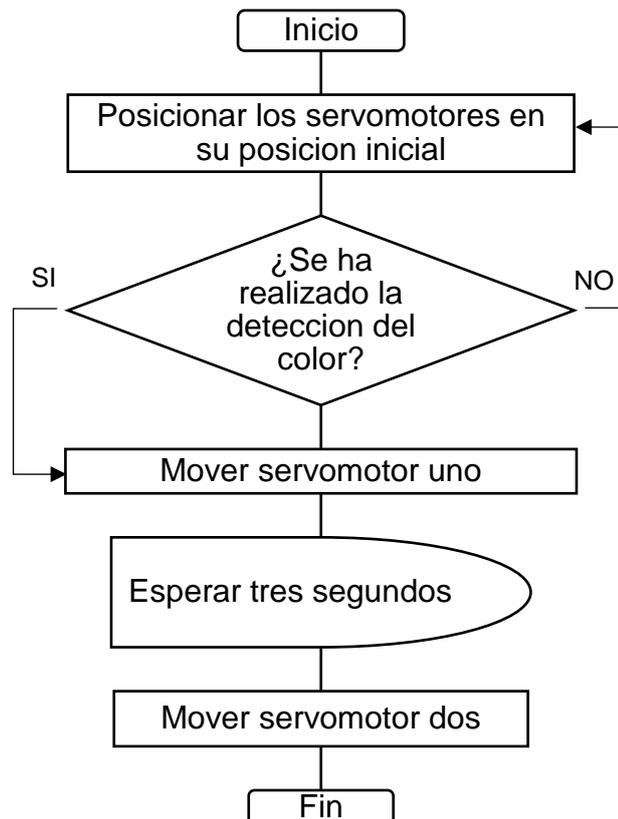


Figura 68 Diagrama de flujo programación modulo clasificador

A continuación se describe de manera más amplia lo escrito en el flujograma, tenemos:

- Posicionar en la posición de origen a los dos servomotores. Una vez introducida la pieza la cámara comienza a realizar el procesamiento de la imagen.
- Una vez detectado el color del objeto e comanda al servomotor uno para que llegue a su posición indicada en el programa.

Posteriormente se espera un tiempo de tres segundos hasta que la mesa giratoria llegue a la posición programada.

- Completados los tres segundos se activa el servomotor dos el cual envía al objeto a su lugar de destino.

En base a esto se detalla alternativas de elementos electrónicos en base a la disponibilidad del mercado, características, complejidad y costo, que en conjunto cumplan con la funcionalidad del módulo clasificador de objetos.

3.19 Tarjeta de control

La tarjeta de control es de gran importancia en el módulo clasificador debido a que será la encargada de interactuar con el sistema de Visión Artificial y los actuadores del módulo, la tarjeta debe ser de fácil acceso en el mercado ecuatoriano y de uso sencillo.

3.19.1 Alternativas de selección para la tarjeta de control

Alternativa 1. Arduino uno

“Arduino es una plataforma computacional física open-source basada en una simple tarjeta de I/O y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. El Arduino Uno R3, observar figura 69, puede ser utilizado para desarrollar objetos interactivos” (“Arduino UNO R3”, 2014).



Figura 69 Arduino uno

Fuente: (“Arduino UNO R3”, 2014)

De acuerdo con (“Arduino UNO R3”, 2014) las características del Arduino UNO son:

- Microcontrolador ATmega328.
- Voltaje de entrada 7-12V.
- 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).
- 6 entradas análogas.
- Reloj de 16MHz de velocidad.

Alternativa 2. Raspberry Pi 2 Modelo B

Raspberry Pi 2 Modelo B es una diminuta placa base de 85 x 54 milímetros en el que se aloja un chip Broadcom BCM2836 con procesador ARM hasta a 1 GHz de velocidad, GPU VideoCore IV y hasta 1 GB de memoria RAM como se observa en la figura 70. (PCcomponentes.com, 2016)



Figura 70 Raspberry Pi 2 Modelo B

Fuente: (“Raspberry Pi 2 Modelo B”, 2017)

De acuerdo con (“Raspberry Pi 2 Modelo B”, 2017) las características de la tarjeta son:

- Procesador: Quad-Core Cortex A7 a 900MHZ
- RAM: 1GB.
- USB 2.0
- HDMI
- Ethernet

- Combo audio/mic
- Interfaz de cámara (CSI)
- Interfaz de Pantalla (DSI)
- Micro SD
- Núcleo Grafico 3D

3.19.2 Criterios de selección para la tarjeta de control

En base a los criterios descritos en la tabla 11, se procede a hallar la mejor alternativa en tarjetas de control

Tabla 11
Selección de la alternativa adecuada para la tarjeta de control

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Disponibilidad	+	+
Programación	+	-
Control de actuadores	0	0
Costo	+	-
Suma +	3	1
Suma 0	1	1
Suma -	0	2
Evaluación neta	3	-1

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 11, la alternativa 1 es la mejor opción para la implementación de la tarjeta de control en el módulo de clasificación, siendo esta la tarjeta Arduino UNO

3.20 Cámara del Sistema de Visión Artificial

Elemento de gran importancia en el Sistema de Visión Artificial, por medio del cual se tendrá acceso a imágenes del mundo real en el mismo tiempo en el que están ocurriendo, actividad necesaria para realizar la clasificación de los objetos.

3.20.1 Alternativas de Selección de la Cámara del Sistema de Visión Artificial

Alternativa 1. Genius FaceCam 320X

La cámara Genius FaceCam 320x presente en la figura 71, “Proporciona una imagen clara y es adecuado para videoconferencia personal. Es Plug & Play y el micrófono incorporado hace que sea fácil de conectar con familiares y amigos” (Genius, 2005).



Figura 71 Genius FaceCam 320X

Fuente: (Genius, 2005)

De acuerdo con (Genius, 2005) las características son:

- Resolución VGA 640x480 píxeles
- Micrófono incorporado sensible
- Enfoque manual
- Soporte universal clip

Alternativa 2. Cámara web LOGITECH C170

La cámara web LOGITECH C170 presente en la figura 72. “Proporciona la manera más sencilla de iniciar videoconferencias y enviar imágenes más fluido, más nítido, más detallado y más claro” (Logitech, 2017).



Figura 72 Cámara web LOGITECH C170

Fuente: (Logitech, 2017)

De acuerdo con (Logitech, 2017) las características son:

- Captura de vídeo: Hasta 1024 x 768 píxeles
- Fotos: Hasta 5 megapíxeles
- Micrófono integrado con reducción de ruido
- Certificación USB 2.0 de alta velocidad
- Clip universal para monitores LCD, CRT o portátiles
- Software de cámara Web Logitech
- Detección de movimiento

3.20.2 Criterios de Selección de cámara del Sistema de Visión Artificial

En base a los criterios descritos en la tabla 12, se procede a hallar la mejor alternativa en cámara para el sistema de visión artificial

Tabla 12

Criterios de Selección para el Sistema de Visión Artificial

Criterios de selección	Conceptos (Alternativas de diseño)	
	Alternativa 1	Alternativa 2
Adaptabilidad	+	-
Disponibilidad	0	0
Resolución	-	+
Estética	+	-
Costo	+	-
Suma +	3	1
Suma 0	1	1
Suma -	1	3
Evaluación neta	2	-2

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 12, la mejor alternativa es la opción 1 para la cámara del sistema de visión artificial, es decir la cámara Genius.

3.21 Sistema de control del módulo clasificador

Primero se establece la conexión con la tarjeta Arduino de cada uno de los elementos externos que intervienen en la clasificación de objetos, desarrollado a través de un software asistido por computador.

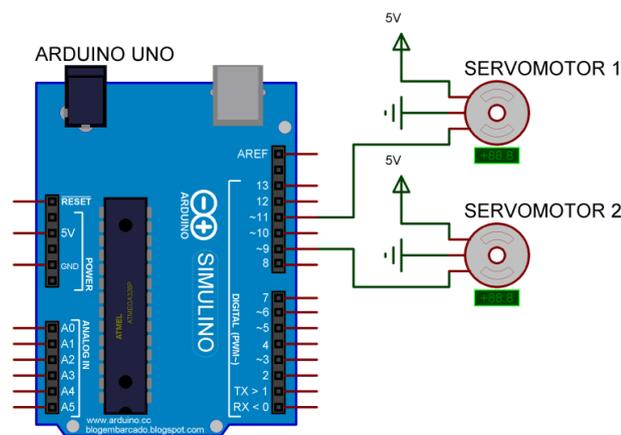


Figura 73 Conexión Arduino - servomotores

Como se presenta en la figura 73, la parte electrónica del módulo consta de dos servomotores, los cuales funcionan en conjunto con Python.

NOTA: La programación de la tarjeta Arduino se encuentra en el ANEXO D

3.22 Clasificación mediante visión artificial

Como se mencionó en el capítulo 2, se decidió realizar la clasificación de los objetos por medio del color, para ello se usara plataformas libres OpenCV, Python y PyQt4. Como se muestra en la figura 74, se desarrolló una pequeña interfaz en la cual se inicia el programa, de ser necesario es posible realizar pausar en el proceso y por ultimo un botón que finaliza el trabajo.



Figura 74 Interfaz clasificación mediante visión artificial

Al pulsar el botón iniciar la aplicación se ejecuta y despliega dos ventanas “VIDEO” y la segunda ventana corresponde a la detección de los distintos colores estas ventanas irán apareciendo de acuerdo al color detectado

Este mismo programa es el encargado de establecer la comunicación con la tarjeta Arduino para comandar los elementos externos que intervienen en la clasificación.

NOTA: Los códigos de programación se encuentran detallados en los ANEXOS E y F

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se detalla paso a paso la construcción de cada uno de los componentes estructurales del sistema, basado en el diseño y selección de materiales realizados en el capítulo anterior, y posteriormente se especifica el procedimiento para implementar cada componente al sistema del brazo robótico y complementar el sistema Mecatrónico.

4.1 Proceso de impresión y piezas finales

Una vez determinado el material con el que será construido los componentes estructurales de la pinza flexible, se procede a imprimir cada una de las piezas con una resolución del 90% tal como se muestra en la figura 75, obteniendo así unas piezas compactas y ligeras, características ideales para el trabajo de la pinza flexible en conjunto con el brazo robótico. El tiempo de impresión y el peso de cada una de las piezas varían y se detallan en la tabla 13.

Tabla 13
Tiempo de impresión de componentes del sujetador

Objeto	Cantidad	Peso c/u [gr]	Tiempo [horas]
Soporte	1	155,36	7
Fijador	4	2,93	1,5
Inserción de aire	4	2,95	1,5

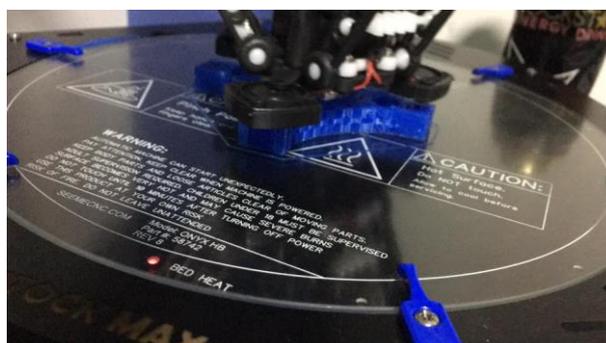


Figura 75 Proceso de impresión 3D

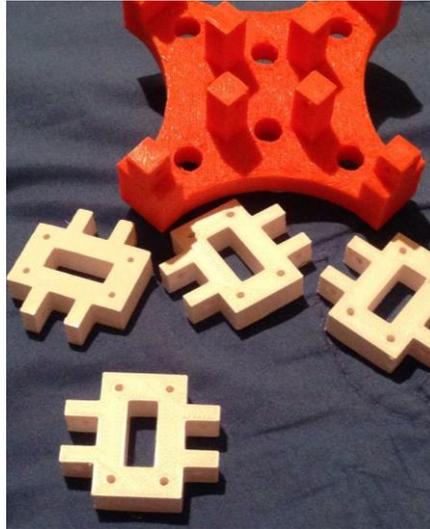


Figura 76 Componentes impresos

Los componentes impresos por completo se muestran en la figura 76. A cada uno de los componentes se le da un acabado con pintura metálica para que estos tengan un mejor aspecto y un color muy parecido al aluminio. El proceso de pintura se lo realiza a mano utilizando un componente que ayude adherir la pintura al plástico, los componentes terminados se muestran en la figura 77.



Figura 77 Componentes con acabado final

4.2 Construcción de matriz para elaboración de actuadores blandos

Para la fabricación de los actuadores blandos es necesario tener una matriz para lo cual estas serán impresas en 3D con material acrilonitrilo

butadieno estireno (ABS) debido a la resistencia y uniformidad que posee este. Ayudando a que cada uno de los actuadores blandos posean la forma y textura ideal. La matriz está compuesta por tres componentes los cuales son: capa inferior flexible, capa superior extensible y entradas capa superior extensible. El proceso de fabricación y la matriz se muestran en las figuras 78, 79, 80, 81.

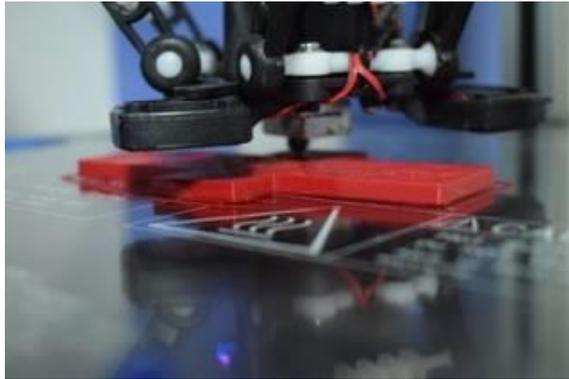


Figura 78 Proceso de impresión matriz

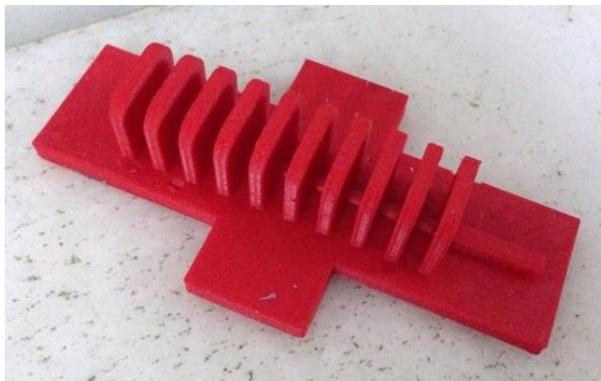


Figura 79 Matriz entrada capa superior extensible



Figura 80 Matriz capa superior extensible



Figura 81 Matriz capa inferior flexible

4.3 Fabricación de actuadores blandos

La fabricación de cada uno de los actuadores blandos se realiza con caucho de silicona y conlleva un proceso que dura alrededor de siete a ocho horas el cual se encuentra dividido en cinco etapas las cuales son: preparación de moldes, preparación de material, moldeado del actuador y cámara de vacío, secado y desmolde y por último el sellado y su tiempo de duración se detalla en la tabla 14. El proceso de fabricación se detalla a continuación.

Tabla 14

Duración de cada etapa de elaboración de actuadores blandos

Etapas	Duración [minutos]
Preparación de moldes	10
Preparación de material	30
Moldeado del actuador y cámara de vacío	20
Secado y desmolde	380
Sellado	10

4.3.1 Preparación de moldes

La siguiente etapa es muy importante para iniciar la fabricación de los actuadores blandos, en la cual los moldes son lubricados con aceite, junto con la ayuda de un pincel tal como se muestra en las figuras 82, 83, 84, se procura llegar a cada rincón de los moldes ya que esto ayuda a que el material no se pegue al molde y sea mucho más fácil desmoldar los actuadores blandos. Es importante no acumular el aceite en los moldes ya

que este ocupa el lugar del caucho y no permite que los actuadores tenga la forma predeterminada.



Figura 82 Lubricación molde capa inferior flexible



Figura 83 Lubricación molde capa superior extensible



Figura 84 Lubricación molde entrada capa superior extensible

4.3.2 Preparación de material

Para la fabricación del actuador blando se necesita moldear las tres partes cuyo material es Elastosil M4601, antes de introducir el elastómero en el molde. El primer paso es pesar la parte A y la parte B, debido a que el Elastosil necesita ser mezclado en un ratio 1:9 de parte A (caucho de silicona) respecto a la cantidad de parte B (catalizador), además para darle color se utiliza tinta de impresora color azul tal como se indica en la figura 85. Después se introduce en una centrifugadora para que se produzca una mezcla homogénea. En caso de no tener una centrifugadora se puede realizar la mezcla manualmente como se muestra en las figuras 86 y 87.



Figura 85 Colocación de tinta



Figura 86 Colocación parte A y B en envase para mezclar



Figura 87 Mezcla de las partes

4.3.3 Moldeado del actuador blando y cámara de vacío

En primer lugar se debe rellenar el molde capa superior extensible, asegurándose de que se llenen cada uno de los compartimentos, seguido se llena el molde capa inferior flexible como se muestra en las figuras 88 y 89, a continuación se debe esperar unos segundos hasta que el elastómero se asiente y cubra todas las paredes del molde, en seguida se ingresa por diez minutos aproximadamente a los dos moldes a una cámara de vacío elaborada artesanalmente que se muestra en la figura 90, en la cual se busca extraer la mayor cantidad de burbujas de aire que puedan existir en el material, una vez extraídos los moldes de la cámara se procede a eliminar las burbujas que se encuentran en la superficie del mismo con una aguja metálica de la forma que se muestra en la figura 91.

Paso siguiente es tomar el molde entrada capa superior extensible e insertarlo sobre el molde principal tal como se indica en la figura 92, para formar la capa superior extensible.

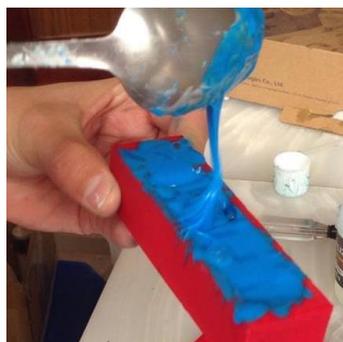


Figura 88 Relleno de molde capa superior extensible



Figura 89 Relleno de molde capa inferior flexible



Figura 90 Moldes en cámara de vacío



Figura 91 Eliminar burbujas



Figura 92 Formación de actuador blando capa superior extensible

4.3.4 Secado y desmolde

Una vez moldeados los actuadores blandos, se debe conservar a temperatura ambiente sin moverlos como se muestra en la figura 93, durante un largo tiempo (seis horas aproximadamente) para que el caucho se seque y conserve la forma de la matriz, pasado este tiempo se debe desmoldar los actuadores de forma muy cuidadosa para evitar que estos se deformen o se rompan tal como se muestra en la figura 94.



Figura 93 Secado de material



Figura 94 Desmolde de actuador blando

4.3.5 Sellado

Una vez desmoldados los actuadores, se debe retirar el material sobrante utilizando una tijera como se muestra en la figura 95, evitando romperlos, posteriormente se elabora un poco más de material para unir las dos partes del actuador, colocando caucho alrededor de las paredes inferiores de las partes como se indica en la figura 96, para después unir y presionar una con otra y dejarlos reposar por un tiempo más antes de utilizarlos.



Figura 95 Recorte de material extra



Figura 96 Sellado de actuadores blandos



Figura 97 Actuadores blandos finales

4.4 Ensamble de pinza flexible

Una vez contruidos todos los componentes, se procede a ensamblar la pinza flexible para ser utilizado como tal, para lo cual se tiene un proceso que no es obligatorio seguir ya que cada uno de los componentes disponen de ranuras iguales que se acoplan fácilmente, sin embargo se muestra la forma en la que se podría ensamblar el sistema y todo ese proceso toma un tiempo de veinte y cinco minutos aproximadamente.

El primer paso es colocar la tubería dentro de los actuadores blandos como se muestra en a figura 98, estos ingresan 1,5 cm en el actuador, paso siguiente es ingresar el actuador blando junto con la tubería en la pieza fijador lo cual se indica en la figura 99, la unión de la pieza inserción de aire se muestra en la figura 100, la cual permite que la tubería se mantenga dentro del actuador blando y funcione de forma segura mediante el tornillo que cruza dicha pieza y esto se muestra en la figura 101, para unir las piezas inserción de aire y fijador se utiliza cuatro tronillos M3x30 con sus respectivas tuercas.

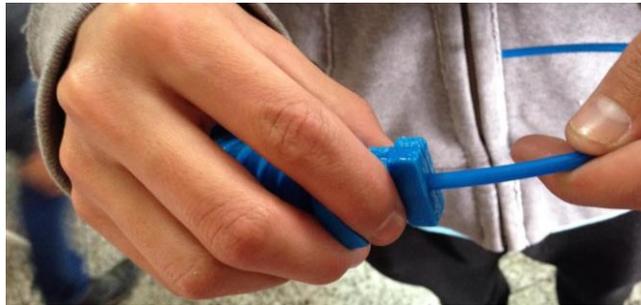


Figura 98 Colocación de tubería



Figura 99 Insertar actuador en fijador



Figura 100 Unión inserción de aire-fijador



Figura 101 Ajuste y aseguramiento de tubería

Una vez armado cada uno de los actuadores blandos, el paso siguiente es acoplar todos los componentes a la pieza principal soporte tal como se muestra en la figura 102, es decir, en el soporte en la cual se concentran todos los componentes y la cual permite fijar a la pinza flexible al brazo robótico, esto se muestra en las figuras 103 y 104. El resultado final se muestra en la figura 105.

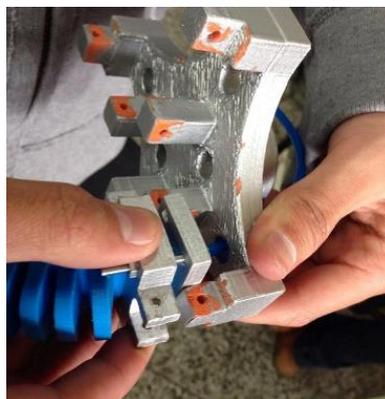


Figura 102 Acoplamiento de componentes al sujetador



Figura 103 Pinza flexible final



Figura 104 Acople de la pinza flexible al brazo robótico



Figura 105 Pinza flexible y brazo robótico

4.5 Construcción de módulo

El material seleccionado con el que será construido el módulo de clasificación se muestra en la figura 106, una vez obtenida la plancha de acero, se procede a medir de acuerdo al diseño realizado en un software de

diseño asistido por computador, para poder realizar los dobleces y cortes necesarios. Con la ayuda de maquinaria tal como se indica en las figuras 107 y 108.



Figura 106 Plancha de acero laminado en frío a ser doblada y cortada



Figura 107 Dobles de material



Figura 108 Corte de material

Una vez cortado y doblado el material de acuerdo al diseño, este se debe soldar para juntar y formar la base como se muestra en la figura 109, en la cual se colocaran las siguientes planchas de acero para separar al módulo en tres pisos como.



Figura 109 Estructura base del módulo

Con la estructura base ya soldada y segura se insertan los diferentes pisos a las alturas predeterminadas como se muestra en la figura 110 y ubicando la tubería la cual permitirá unir a cada uno de ellos, estos elementos también se fijan mediante soldadura tal como se observa en la figura 111.



Figura 110 Pisos para dividir el módulo

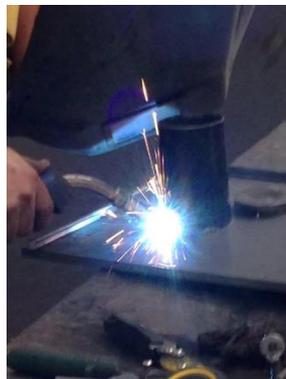


Figura 111 Fijación de tubería mediante soldadura

Una vez que se tenga asegurado todo el modulo como en la figura 112, se procede a pintar. El método de pintura a utilizar se realiza mediante un proceso de pintura electrostática, el cual se lo realiza en instalaciones que poseen un horno de curado, cabinas para la aplicación con pistolas electrostáticas y una cadena de transporte aéreo en donde se cuelgan las piezas tal como se puede observar en la figura 113.



Figura 112 Módulo ensamblado



Figura 113 Pintura electrostática de módulo

Con el modulo pintado, solo queda colocar las ruedas en la parte inferior del mismo, para que este pueda ser transportado con facilidad de un lugar a otro y la estructura metálica del módulo queda lista como se muestra en la figura 114.



Figura 114 Módulo terminado

El modulo en su interior tiene partes móviles las cuales ayudan en la clasificación de los objetos, los cuales serán elaborados por medio de impresión 3D como se muestra en la figura 115, la elaboración de estas dos piezas tiene un tiempo de duración de veinte horas aproximadamente, estas dos piezas se acoplan al módulo mediante los servomotores que son colocados en los agujeros realizados en la construcción tal como se muestra en la figura 116.



Figura 115 Paleta de empuje y plato giratorio

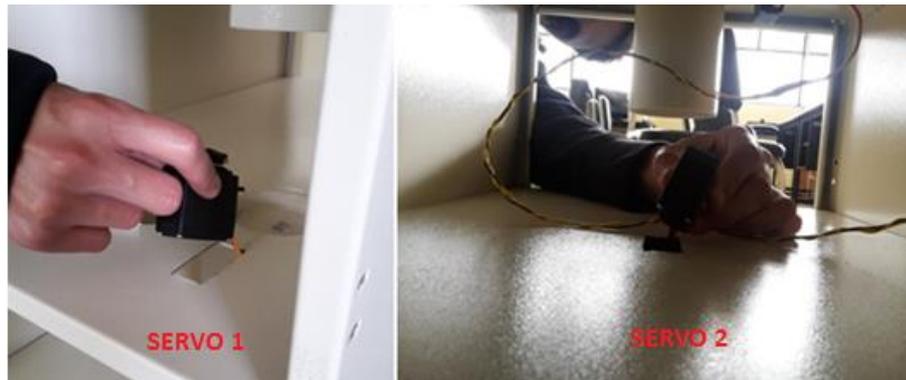


Figura 116 Colocación de servomotores

Para finalizar se ubica la cámara web en la posición ideal para la clasificación de objetos como se muestra en la figura 117 y por último se dan unos acabados al módulo colocando canaletas plásticas para cubrir los cables como se observa en la figura 118 para que estos no interfieran en el funcionamiento de los componentes móviles del módulo.



Figura 117 Colocación de cámara



Figura 118 Colocación de canaletas plásticas

Finalmente, después de colocar cada uno de los componentes que interfieren en la clasificación, el modulo clasificador se encuentra finalizado y listo para realizar pruebas de funcionamiento, como se muestra en la figura 119.



Figura 119 Modulo clasificador de objetos

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Pruebas de funcionamiento del actuador blando

Primeras pruebas del actuador blando

Mediante estas pruebas se pretende examinar la activación, velocidad de respuesta, y funcionalidad del actuador blando al momento de ser presurizado. Para ello se realizó las primeras pruebas del mismo como se observa en la figura 120 y 121, en el cual se observa la activación del actuador con una presión de 1 bar, lo cual es correcto, debido a los estudios realizados por (Mosadegh, 2014), el cual sugiere que para una activación completa del actuador es necesario aplicar una presión de aire mayor a 80kPa.



Figura 120 Primeras pruebas del actuador blando sin presurizar



Figura 121 Primeras pruebas del actuador blando presurizado

Al ser las primeras pruebas se obtuvo una buena respuesta en lo que se refiere a la activación, velocidad de respuesta y funcionalidad del actuador quedando definido el diseño del actuador. Sin embargo se experimentó pequeñas fugas de aire alrededor del actuador blando lo cual sugiere tener más precaución al momento de la construcción del mismo.

Pruebas finales del actuador blando

Posteriormente corregidos los problemas expuestos con anterioridad, se tomó mayores precauciones al momento de la construcción, especialmente al momento de eliminar las burbujas que se crean en el actuador, dando los siguientes mostrados en las figuras 122 y 123.



Figura 122 Pruebas finales del actuador blando sin presurizar



Figura 123 Pruebas finales del actuador blando presurizado

Como se observan en las figuras 122 y 123, el actuador blando al no presentar fugas en ningún lugar se acciona de manera completa formando una especie de circunferencia lo cual quiere decir que está correcto.

5.2 Pruebas de movimiento de actuador blando implementado en brazo robótico

Primeras pruebas de movimiento de actuador blando implementado en brazo robótico

Mediante estas pruebas realizadas en conjunto con el brazo robótico en el cual será implementado el actuador blando, se determina el comportamiento e interacción entre la nueva pinza flexible y el brazo robótico como se observa en la figura 124. Además otra parte importante es probar el sistema de control que comandara a la pinza flexible, como se explicó en el capítulo tres, el actuador blando será controlado por la estación robot y la señal que permite el envío de aire está a cargo de una electroválvula.

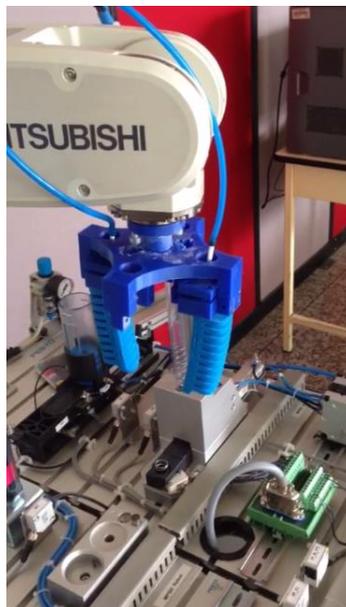


Figura 124 Primeras pruebas de interacción entre actuador blando y brazo robótico

A continuación se procedió a la activación de la electroválvula para que permita el paso del aire presurizado hacia el robot y posteriormente hacia el actuador blando, a su vez se comprobó la capacidad del actuador para la manipulación de objetos con distintas geometrías, presentando los siguientes resultados presentes en la figura 125.

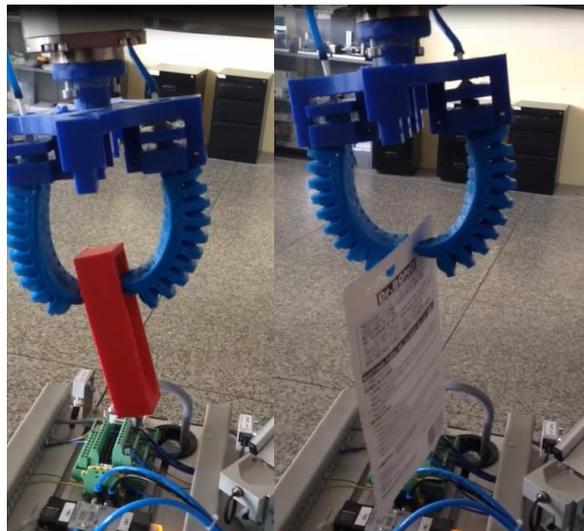


Figura 125 Primeras pruebas de manipulación de objetos con distintas geometrías

Se obtuvo un buen resultado de interacción entre el actuador blando y el brazo robótico, sin embargo se presentó pequeños errores en el diseño de la pieza sujetador, la cual no prestaba las suficientes facilidades al momento de acoplarse al brazo robótico. Además la manipulación de objetos con geometrías irregulares se cumplió exitosamente, a pesar de solo implementar dos actuadores blandos, este fue capaz de sostener dichos objetos como se observa en la figura 125.

Pruebas finales de movimiento del actuador blando implementado en brazo robótico

Una vez corregidos las falencias existentes en la estructura encargada de acoplar al actuador blando con el brazo robótico, se procedió a implementarlo y verificar su comportamiento e interacción con el mismo como se muestran en la figura 126.



Figura 126 Pruebas finales de interacción entre actuador blando y brazo robótico

Finalmente se procede a realizar las pruebas de manipulación con distintos objetos. Estas pruebas constan en recoger al objeto desde su posición inicial, y transportarlo como se muestra en la figura 127.

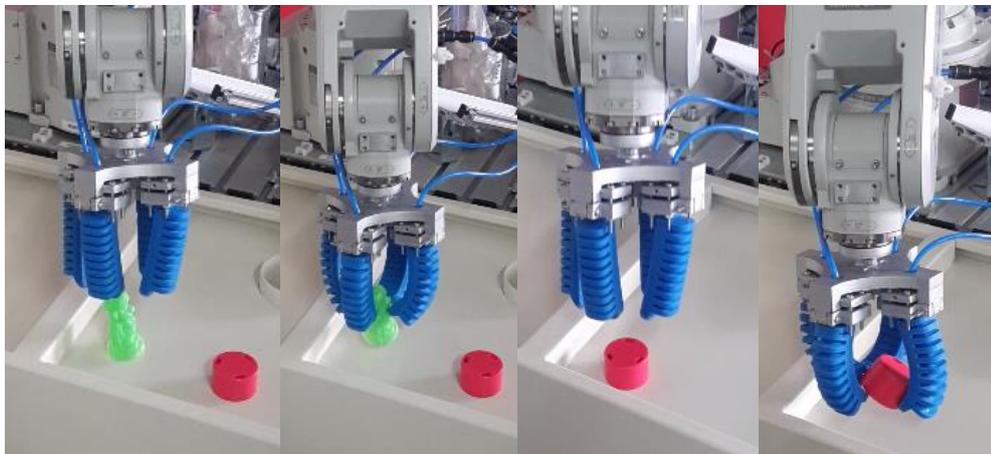


Figura 127 Pruebas finales de manipulación de objetos con distintas geometrías

La manipulación de los distintos objetos descritos en la tabla anterior, se los realizo de manera correcta en la cual no se presentaron fallos en su manipulación. El actuador se comporta de manera ideal y su respuesta al ser comandado por la estación robot es la indicada.

5.3 Pruebas en el módulo clasificador de objetos

Las pruebas realizadas en el módulo clasificador de objetos, consta primeramente en verificar los diseños de las piezas encargadas de la extracción y clasificación de los objetos. Posteriormente se procede a comprobar la clasificación de los objetos realizada mediante visión artificial para finalmente comprobar la funcionalidad total del módulo.

5.3.1 Pruebas y calibración de piezas paleta de empuje y plato giratorio

Primeras pruebas con pieza paleta de empuje

Las primeras pruebas fueron en la fase de extracción del objeto, en el cual primeramente se tenía pensado un diseño rectilíneo de la pieza, pero debido a que los objetos son de distinta forma se optó por realizar un diseño tipo gancho como se muestra en la figura 128, además la unión con el servo era de manera sencilla como se muestra en la figura 129, sin embargo en las pruebas realizadas se tuvo fallas con el agarre del servo, debido a ello fue necesario rediseñar el acople con el servo.



Figura 128 Primer diseño de paleta de empuje



Figura 129 Fallos en acople con servomotor

Pruebas finales con pieza paleta de empuje

Se realizó la prueba final de la extracción de la pieza de manera exitosa aunque para brindar una mayor seguridad al momento de la extracción se decidió aumentar el grosor de la pieza extractora y redondearla completamente en forma de círculo, y el acople con el servo resulto satisfactorio.

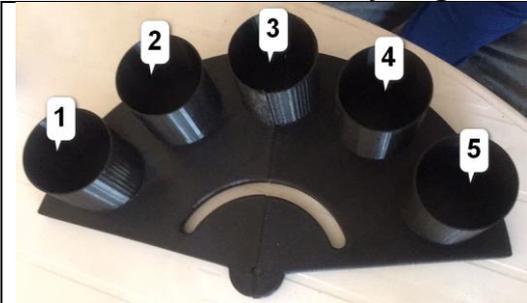


Figura 130 Pruebas finales con pieza extractora

Pruebas finales con plato giratorio

Las pruebas con el plato giratorio son necesarias para calibrar el ángulo que debe girar el servomotor para que el objeto a clasificar caiga en el lugar correcto, las zonas de clasificación y los ángulos de giro del servomotor se encuentran detallados en la tabla 15.

Tabla 15
Zonas de clasificación y ángulos de giro

	1. Color violeta	1. Ángulo 20°
	2. Color azul	2. Ángulo 50°
	3. Color verde	3. Ángulo 80°
	4. Color naranja	4. Ángulo 110°
	5. Estante adicional	

Cada uno de los grados viene definidos en el programa de Arduino presentes en el anexo D, en el cual está definido los ángulos de desplazamiento del servomotor encargado de comandar al plato giratorio.

5.3.2 Pruebas de clasificación de objetos mediante visión artificial

Como se explicó en capítulos anteriores, la clasificación se realiza mediante el color del objeto debido a ello esta es considerada la parte más importante para el correcto funcionamiento del módulo clasificador, ya que clasifica a los objetos y se encarga de la interacción con los servomotores. Primeramente se comprueba la detección de los cinco colores a detectar, para ello se desarrolló un programa presente en el anexo E, en el cual se obtiene los valores en HSV máximos y mínimos pertenecientes a cada color como se muestran en las figuras 131, 132, 133, y 134, para posteriormente ser definidos en el programa final.

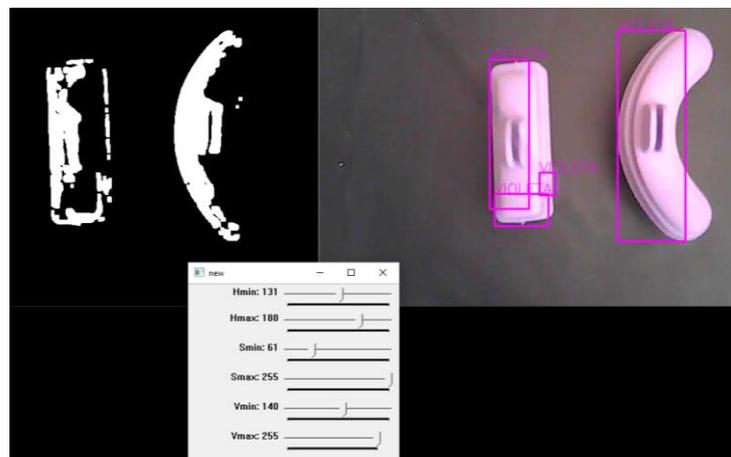


Figura 131 Pruebas de detección color violeta

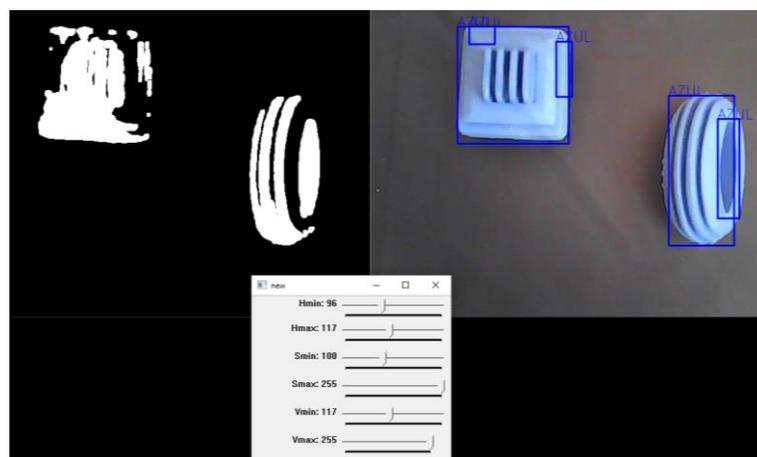


Figura 132 Pruebas de detección color azul

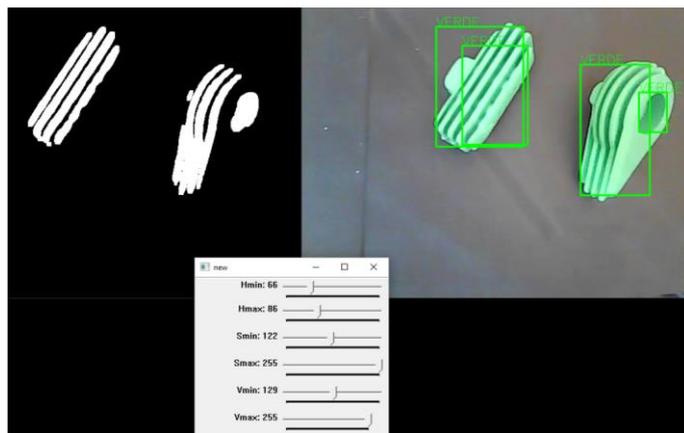


Figura 133 Pruebas de detección color verde

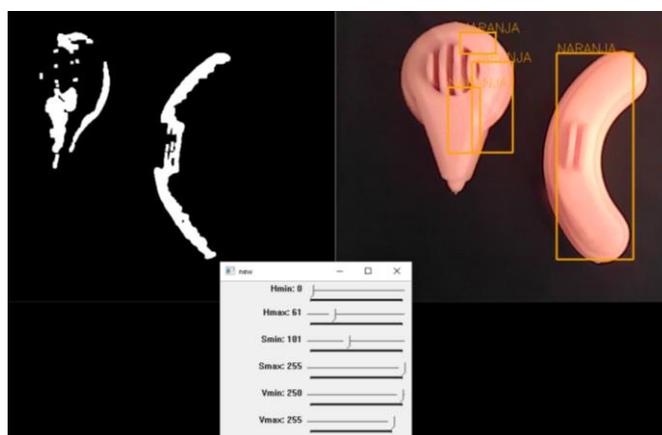


Figura 134 Pruebas de detección color naranja

El color blanco se lo usa como seteo de los servomotores, siendo de gran utilidad para poner en estado inicial a la paleta de empuje y al plato giratorio despues de terminar con la clasificación. Sus valores HSV se muestran en la figura 135.

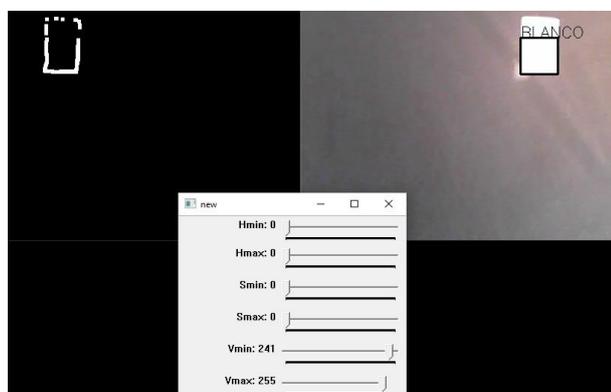


Figura 135 Pruebas de detección color blanco

5.4 Pruebas de todo el sistema

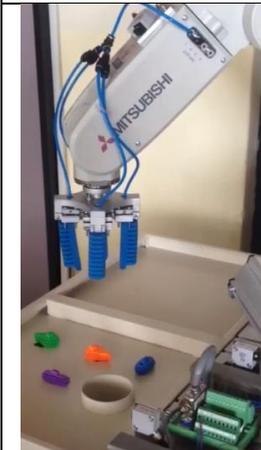
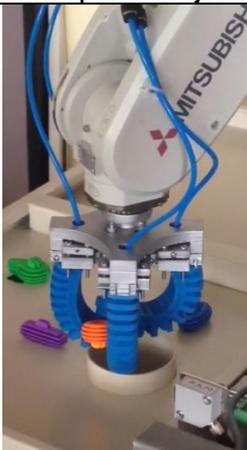
Para asegurar el correcto funcionamiento del módulo clasificador de color conjunto a la manipulación de objetos irregulares mediante la pinza flexible se pondrá a prueba todos los sistemas que integran el mismo, por lo cual se ha dividido en dos etapas.

- Etapa de manipulación de objetos
- Etapa de clasificación de objetos

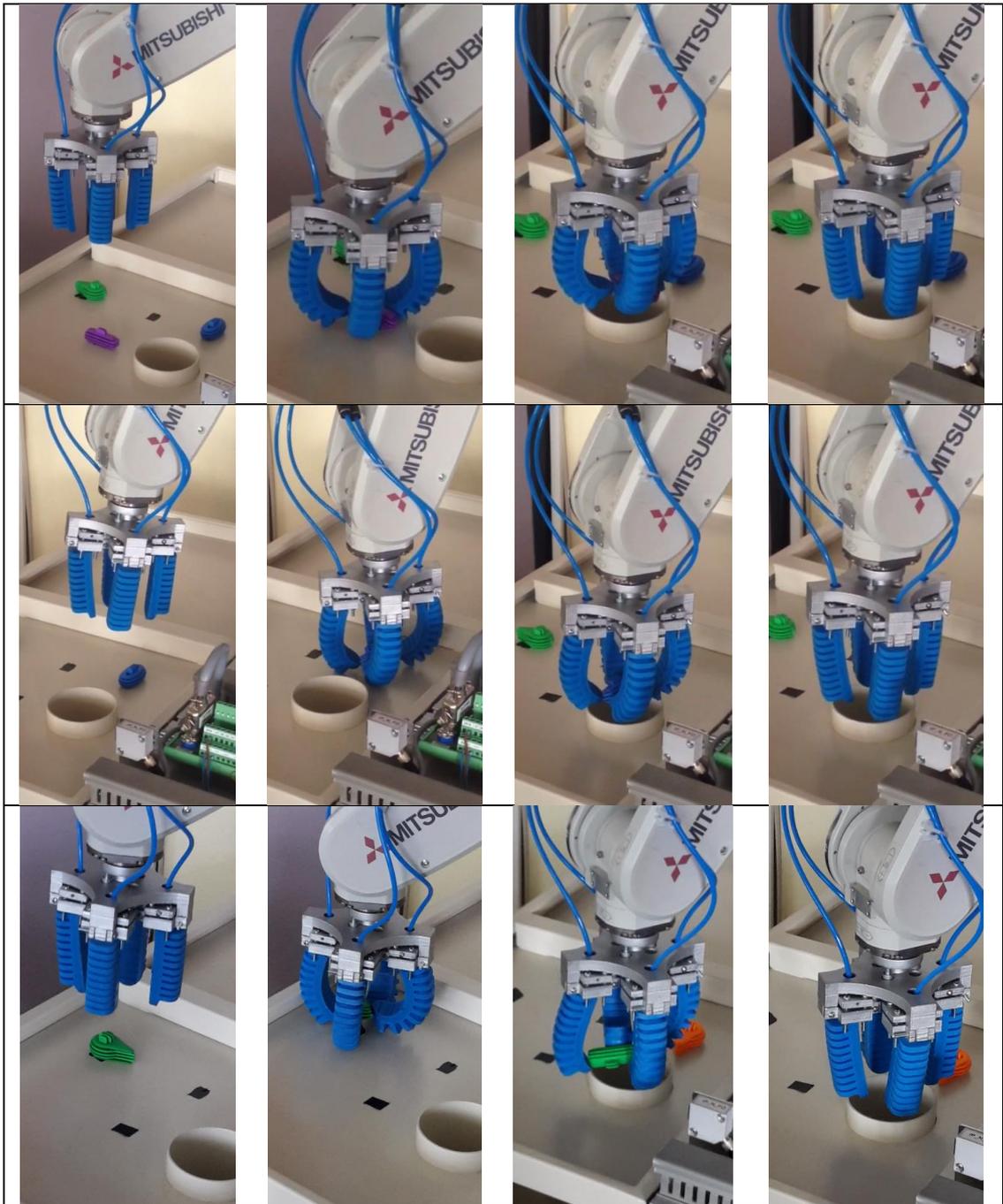
5.4.1 Etapa de manipulación de objetos

En esta etapa el robot es el encargado de dirigirse desde su posición inicial hacia el lugar en donde se encuentran los objetos, posteriormente se los transporta al depósito del módulo clasificador para su respectiva clasificación, para ello se realizó ocho pruebas dos por cada color, cumpliendo todos los requerimientos como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16
Pruebas de manipulación con objetos irregulares

Posicion inicial	Recoger objeto	Manipular objeto	Soltar objeto
			

CONTINÚA →



5.4.2 Etapa de clasificación de objetos

Una vez depositado el objeto se procede a clasificarlo de acuerdo a la segmentación de su color más característico.

Pruebas de clasificación de objetos de color violeta, azul, verde y naranja



Figura 136 Clasificación de objetos

Como se observa en la figura 136, la clasificación de cada objeto se realizó sin problemas, se realizaron las 8 pruebas, finalmente se muestra al plato giratorio con sus objetos clasificados como se muestra en la figura 137.



Figura 137 Plato giratorio con elementos clasificados

5.5 Validación de la hipótesis

La hipótesis planteada es la siguiente:

¿El diseño e implementación de un pinza flexible basado en robótica blanda ayudará a la manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular?

- Variable Independiente: Pinza flexible basado con tecnología de robótica blanda.
- Variable Dependiente: Manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular.

Para la validación de la hipótesis se utiliza la técnica de chi-cuadrado, es una prueba de hipótesis la cual determina si dos variables están relacionadas o no. (Gonzalez, 2016)

En primer lugar se debe establecer una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis de trabajo (H_1).

- Hipótesis Nula (H_0): El diseño e implementación de un pinza flexible basado en robótica blanda no ayudará a la manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular
- Hipótesis de Trabajo (H_1): El diseño e implementación de un pinza flexible basado en robótica blanda ayudará a la manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular

Se procede a realizar una evaluación del tiempo que toma manipular y clasificar cada pieza presentes en las pruebas de funcionamiento para obtener datos acerca de la frecuencia observada. La cantidad de pruebas a realizar por cada pieza son 50 en total con la cual se espera obtener un error mínimo (< 0.2) como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17
Datos obtenidos de la frecuencia observada

Color / Forma	Rapido (< 61 seg)	Medio (> 62 seg)	Lento (> 120 seg)	Total
Naranja A	25	15	10	50
Naranja B	28	10	12	50
Verde A	23	20	7	50
Verde B	29	19	2	50
Violeta A	21	21	8	50
Violeta B	27	10	13	50
Azul A	28	16	6	50
Azul B	29	11	10	50
Total	210	122	68	400

Una vez obtenidos los datos de la frecuencia observada (O_i) se procede al siguiente paso el cual es calcular la frecuencia esperada (E_{ij}). Definido por la Ec. 1. (Gonzalez, 2016)

$$E_{ij} = \frac{O_i * O_j}{O} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

O_i = Frecuencia Observada

O_j = Total Pruebas

E_{ij} = Frecuencia Esperada

O= Total

Teniendo como resultado los datos presentados en la tabla 18.

Tabla 18
Resultados del cálculo de la frecuencia esperada

Color / Forma	Rapido (< 61 seg)	Medio (> 62 seg)	Lento (> 120 seg)	Total
Naranja A	26,25	15,25	8,5	50
Naranja B	26,25	15,25	8,5	50
Verde A	26,25	15,25	8,5	50
Verde B	26,25	15,25	8,5	50
Violeta A	26,25	15,25	8,5	50
Violeta B	26,25	15,25	8,5	50
Azul A	26,25	15,25	8,5	50
Azul B	26,25	15,25	8,5	50
Total	210	122	68	400

Por último se realiza el cálculo final del chi – cuadrado con ayuda de la Ec. 2.
(Gonzalez, 2016)

$$X_{cal}^2 = \sum \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

X_{cal}^2 = Chi cuadrado calculado

i = Número de filas

j = Número de columnas

Con lo cual se obtiene los resultados presentados en la tabla 19

Tabla 19
Resultado de Chi - Cuadrado

Color / Forma	Rapido (< 61 seg)	Medio (62 - 119 seg)	Lento (> 120 seg)	Total
Naranja A	0,05952381	0,004098361	0,264705882	
Naranja B	0,116666667	1,807377049	1,441176471	
Verde A	0,402380952	1,479508197	0,264705882	
Verde B	0,288095238	0,922131148	4,970588235	
Violeta A	1,05	2,168032787	0,029411765	
Violeta B	0,021428571	1,807377049	2,382352941	
Azul A	0,116666667	0,036885246	0,735294118	
Azul B	0,288095238	1,18442623	0,264705882	Total
Total	2	9	10	21

Es necesario el cálculo del grado de libertad por lo que se recurre a la Ec. 3

$$v = (i - 1) * (j - 1) \quad \text{Ec. 3}$$

$$v = (8 - 1) * (3 - 1)$$

$$v = 7 * 2$$

$$v = 14$$

Por lo general se trabaja con un nivel de significancia (riesgo) de $p = 0.25$, lo que indica que se espera un alto grado de funcionalidad del proyecto. Con los presentes valores se recurre al anexo G, en la cual seleccionamos el valor correspondiente.

Chi-Cuadrado tabulado = 17,11

Finalmente para validar la hipótesis se debe realizar la siguiente comparación

$$X_{cal}^2 > X_{tab}$$

$$21 > 17,11$$

Con lo cual se llega a la conclusión de aceptar la hipótesis de trabajo que dice: “El diseño e implementación de un pinza flexible basado en robótica suave ayudará a la manipulación y clasificación de objetos con geometría irregular”

5.6 Análisis financiero

La tabla 20 muestra el costo de cada componente involucrado en el desarrollo del proyecto de investigación

Tabla 20
Costos del proyecto

Cantidad	Componente	Valor unitario	Valor total
2	Servomotores MG 996R	15	30

CONTINÚA →

1	Arduino UNO	20	20
1	Protoboard	2	2
1	Cámara Genius FaceCam	20	20
2	Extensión USB	5	10
1	Estructura metálica modulo clasificador	200	200
30	Tornillos M3x30	2	2
4	Tornillos M5x10	1	1
1	Impresiones 3D	300	300
1	Acabados impresión 3D	30	30
1	Elastosil M420	40	40
1	Gastos varios	150	150
		TOTAL	805

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se realizó una investigación en distintas fuentes científicas con el fin de obtener toda la información necesaria para el desarrollo del proyecto de investigación.
- Al ser una tecnología nueva, aun en desarrollo, la investigación se centró en dos diseños predominantes en actuadores blandos, debido a mejores características se optó por la morfología FPN, posteriormente se realizó el diseño del mismo en software asistido por computador, con el fin de establecer parámetros de diseño
- Con el análisis dinámico del sujetador se comprueba que la elección del material fue la correcta y además que este soporta la presión necesaria para sujetar los objetos y se mueven de la forma necesaria.
- Se diseñaron distintos elementos que conforman la parte mecánica de la pinza flexible tomando en cuenta los requerimientos de adaptabilidad tanto del actuador blando como del brazo robótico al cual se implementó.
- Evidentemente cada uno de los componentes son seguros para realizar su trabajo y además se asegura que estos trabajaran en condiciones extremas ya que gracias a los análisis realizados se comprueba que estos mantienen un alto factor de seguridad al cargar un gran peso.

- La activación de la pinza flexible es netamente neumática, la cual es comandada por el controlador del brazo robótico, desarrollándose así la función de manipulación de objetos.
- El módulo fue diseñado con el fin de emular la forma del sistema en el que se encuentra instalado el brazo robótico, por ende este cumple con las medidas previstas, además este permite la clasificación ideal de los objetos de una forma dinámica y rápida.
- El sistema de control del módulo clasificador de objetos, se realizó mediante un sistema de visión artificial, el cual se basa en la segmentación y reconocimiento de colores de cada objeto a clasificar.
- Los moldes impresos con acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) son ideales para lograr la fabricación de una gran cantidad de actuadores ya que este material es resistente y permite una continuidad y un buen acabado con lo que los actuadores terminan con una textura lisa.
- El módulo fue construido con acero laminado en frío debido a la facilidad de adquisición además de que sus características de doblez y resistencia que permiten un buen acabado, al igual que el método de pintura.
- La construcción del sujetador es relativamente fácil ya que cada uno de los componentes se acopla en cualquier lugar, es decir que no se necesita seguir un proceso para armar el sujetador.
- La implementación y construcción de todo el sistema Mecatrónico lleva un tiempo considerablemente extenso ya que este cuenta con una gran cantidad de componentes que se elaboran por separado y cada uno de estos es indispensable para realizar el trabajo.

- Las pruebas realizadas en la fase de manipulación de objetos fueron satisfactorias, obteniendo buenos resultados con distintos objetos con distintas morfologías, comprobando la funcionalidad de la pinza flexible en manipulación de objetos irregulares.
- Las pruebas realizadas en la fase de clasificación de objetos fueron satisfactorias, obteniendo buenos resultados de detección del color más característico del objeto y clasificando en su zona establecida.
- Basándonos en la hipótesis planteada y en el análisis financiero se puede concluir que el sistema Mecatrónico establecido cumple con cada uno de los objetivos planteados.

6.2 Recomendaciones

- Es importante antes de construir cada uno de los elementos del sistema Mecatrónico diseñarlos con la ayuda de un software y realizar un análisis dinámico y estático para evitar errores en el resultado final y así eliminar gastos innecesarios.
- Para la construcción del módulo es importante disponer de todas las herramientas necesarias y además todos los objetos de protección para evitar riesgos tanto en el módulo como para la persona.
- La elaboración de los actuadores se recomienda elaborarlo en lugar limpio para evitar impurezas dentro de los mismos y además tener a disposición todos los elementos necesarios para la elaboración.
- La mezcla del elastosil se debe hacer de manera uniforme y siempre con la misma cantidad para la construcción de cada uno de los actuadores ya que se desea que estos se comporten de la misma manera.

- Al momento de desmoldar los actuadores se recomienda hacerlo con mucho cuidado ya que estos no pueden sufrir daño en ninguna de sus cavidades puesto que si se tiene algún agujero el aire puede escapar y este no tendrá el movimiento deseado.
- Se recomienda seleccionar un buen amortiguador para la caída de los objetos del primer al segundo nivel ya que estos se deben mantener en un área determinada para seguir el proceso de clasificación.
- Para evitar errores en la clasificación de objetos por color, se recomienda no usar colores parecidos o establecer una cantidad a clasificar no tan grande.
- Se recomienda establecer una velocidad reducida en movilidad del robot para evitar fallos en la manipulación de los objetos.
- Se recomienda seguir investigando esta nueva tecnología, debido a sus altas prestaciones en la robótica, con el fin de seguir mejorando y desarrollando nuevos prototipos funcionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceros, J. (2017). *Aceros*.
- ALMEXA. (2015). *Aluminios*. México, D.F.: Almexa
- Aitken. (2017). Las 5 Generaciones de la Robótica. Recuperado el 15 de septiembre de 2017, a partir de <http://www.guillenxt.com/2012/03/las-5-generaciones-de-la-robotica.html>
- Arduino UNO R3. (2014, octubre 24). Recuperado el 31 de julio de 2017, a partir de <http://arduino.cl/arduino-uno/>
- Arteaga. (2016). Fabrican un músculo artificial que puede revolucionar la robótica suave. Recuperado el 9 de septiembre de 2017, a partir de <http://computerhoy.com/noticias/life/fabrican-musculo-artificial-que-puede-revolucionar-robotica-suave-48476>
- Barbuzano. (2014). La robótica se ablanda. Recuperado el 9 de septiembre de 2017, a partir de <http://esmateria.com/2014/08/09/robots-pulpo-una-nueva-generacion-de-robots-blandos-esta-en-camino/>
- Connolly, F., Walsh, C., & Bertoldi, K. (2017). Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 114(1), 51–56.
- Crespo. (2017). Jupyter Notebook Viewer. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de <http://nbviewer.jupyter.org/github/CAChemE/opencv-python/blob/master/opencv-and-python.ipynb#10.-Colores-y-espacios-de-color>
- Ecoflex® 00-30 Product Information. (2017). Recuperado el 25 de julio de 2017, a partir de <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>
- FESTO. (2003). Solenoid valve CPE10-M1H-5/3G-QS-4.

- FESTO. (2006). Célula de Fabricación Flexible, MPS-C. Recuperado el 25 de abril de 2017, a partir de <https://www.slideshare.net/jesusgomez39750/guia-r-pidarobotmitsubishirv2aj>
- FESTO. (2017). Robot Station 572158: Robot programs. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de <http://www.festo-didactic.com/int-en/services/mps-the-modular-production-system/mps-2000/plc-programs/robot-station-572158-robot-programs.htm?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4zMj45NTEuNjk0Nw>
- Garcia. (2013). Mover motores paso a paso con Arduino. Recuperado el 31 de julio de 2017, a partir de <http://diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino/>
- Genius. (2005). Genius Europe GmbH. Recuperado el 1 de agosto de 2017, a partir de <http://www.genius-europe.com/en/produktdetail.php?ID2=97&ID=31&ID3=826>
- Gonzales. (2012). Fundamentos de Robótica. Recuperado el 6 de agosto de 2017, a partir de http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/index.htm
- Haenel, G. (2012). 2.6. Manipulación y procesamiento de imágenes usando Numpy y Scipy — Scipy lecture notes. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de http://pybonacci.github.io/scipy-lecture-notes-ES/advanced/image_processing/index.html
- HAO Yufei, G. Z. H., XIE Zhexin, G. S., YANG Xingbang, R. Z., & WANG Tianmiao, W. L. (2016). Universal soft pneumatic robotic gripper with

variable effective length. *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, 6109–6114.

Harvard. (2017). Harvard Biodesign Lab. Recuperado el 9 de septiembre de 2017, a partir de <https://biodesign.seas.harvard.edu/home>

Heater, B. (2017). How marine biology inspired Soft Robotics' industrial grippers. Recuperado el 29 de agosto de 2017, a partir de <http://social.techcrunch.com/2017/04/01/soft-robotics-grippers/>

Hexagon Metrology. (2017). ABB Robotics - Västerås | Hexagon Metrology Makine Ticaret ve Sanayi Ltd.Sti. - Turkey. Recuperado el 6 de agosto de 2017, a partir de http://www.hexagonmetrology.com.tr/ABB-Robotics-Vaesters_205.htm#.WYeG0-m2200

Interfareba. (2017). ELASTOSIL M 4601 AB. Recuperado el 25 de julio de 2017, a partir de <http://www.interfareba.com/shop/19-elastosil-m-4601-ab.html>

Kovacs, G., Lochmatter, P., & Wissler, M. (2007). An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and Structures*, 16(2), S306–S317. Recuperado el 5 de julio de 2017, a partir de <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/S16>

Lara. (2014). GEEKY HOUR: OpenCV y Python I (Instalación y ejemplo). Recuperado el 3 de julio de 2017, a partir de <http://geekyhour.blogspot.com/2014/11/opencv-y-python-i-instalacion-y-ejemplo.html>

Logitech. (2017). Webcam C170 - Logitech Support. Recuperado el 1 de agosto de 2017, a partir de http://support.logitech.com/en_us/product/webcam-c170/specs

Marinov, B. (2015, noviembre 5). Inflatable Soft Robotic Glove Exoskeletons.

Recuperado el 29 de agosto de 2017, a partir de <http://exoskeletonreport.com/2015/11/inflatable-soft-robotic-glove-exoskeletons/>

MassRobotics Partners on Advanced Robotics Manufacturing Institute.

(2017, enero 17). Recuperado el 6 de agosto de 2017, a partir de <https://www.massrobotics.org/2017/01/17/massrobotics-partners-advanced-robotics-manufacturing-institute/>

MCI electronics. (s/f). ¿Qué es Arduino? Recuperado el 29 de junio de 2017,

a partir de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>

MG996R High Torque Metal Gear Servo Motor. (2017). Recuperado el 31 de

julio de 2017, a partir de http://probots.co.in/index.php?main_page=product_info&products_id=686#.WX-Foem2200

Mitsubishi. (2010). INSTRUCTION MANUAL Controller setup, basic operation, and maintenance.

Mosadegh. (2014). Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate

Rapidly - 1209.pdf. Recuperado el 3 de mayo de 2017, a partir de <http://gmwgroup.harvard.edu/pubs/pdf/1209.pdf>

Opencv dev team. (2014). Changing Colorspaces — OpenCV 3.0.0-dev

documentation. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de [http://docs.opencv.org/3.0-](http://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_colorspaces/py_colorspaces.htm)

[beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_colorspaces/py_colorspaces.htm](http://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_colorspaces/py_colorspaces.htm)

|

- OpenCV team. (2017). OpenCV library. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de <http://www.opencv.org/>
- Ospina, V. (2007). Documentación y programación de prácticas del brazo robotico de la celda de manufactura flexible de la utp. Recuperado el 25 de agosto de 2017 a partir de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1109/629892O83dp.pdf?sequence=1>
- Posel. (2013). Ingenieros de Inteligencia Artificial Crean un Robot con Apariencia de Niño para El Servicio de Los Seres Humanos. Recuperado el 9 de septiembre de 2017, a partir de http://www.bibliotecapleyades.net/ciencia/ciencia_artificialhumans52.htm
- Pujol. (2017). La cara de la nueva robótica. Recuperado el 9 de septiembre de 2017, a partir de [/canales/salud-biomedicina/tendencias/la-cara-de-la-nueva-robotica](#)
- Python Software Foundation. (2015). PyQt - Python Wiki. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de <https://wiki.python.org/moin/PyQt>
- Python Software Foundation. (2017). 1. Introducción: Tutorial de Python 3.6.0 documentation. Recuperado el 2 de julio de 2017, a partir de <http://docs.python.org.ar/tutorial/3/real-index.html>
- Raspberry Pi 2 Modelo B. (2017). Recuperado el 31 de julio de 2017, a partir de <https://www.pccomponentes.com/raspberry-pi-2-modelo-b>
- River Charles. (2016, enero 21). Harvard Researchers give Soft Robotic Grippers for Deep Sea Exploration. Recuperado el 29 de agosto de

2017, a partir de <http://robotglobe.org/harvard-researchers-give-soft-robotic-grippers-for-deep-sea-exploration/>

Robot industrial. (2017, junio 20). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

Recuperado el 29 de agosto de 2017 a partir de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Robot_industrial&oldid=99973770

Sejzer Raul. (2016). Calidad Total: La Matriz de Pugh para la toma de decisiones. Recuperado el 25 de julio de 2017, a partir de <http://ctcalidad.blogspot.com/2016/10/la-matriz-de-pugh-para-la-toma-de.html>

SIEO Group. (2017). Soluciones de manufactura por medio de robots. Recuperado el 6 de agosto de 2017, a partir de <https://www.sieogroup.com/manufacturera/soluciones-de-manufactura-por-medio-de-robots/>

Tecnologia. (2017). servomotores. Recuperado el 31 de julio de 2017, a partir de <http://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>

The History Of Artificial Intelligence. (2015, marzo 17). Recuperado el 6 de agosto de 2017, a partir de <https://www.sutori.com/item/untitled-50d7-bff9>

Wacker Chemie. (2017). ELASTOSIL. Recuperado el 25 de julio de 2017, a partir de <https://www.wacker.com/cms/en/products/brands/elastosil/elastosil.jsp>

Wheeler, S. (2016, octubre 24). These Robotic Grippers Have A Soft Touch. Recuperado el 29 de agosto de 2017, a partir de <http://www.botmag.com/these-robotic-grippers-have-a-soft-touch/>

Zavia. (2016). Los tentáculos del pulpo inspiran una nueva generación de robots blandos. Recuperado el 8 de agosto de 2017, a partir de <http://es.gizmodo.com/el-pulpo-inspira-una-nueva-generacion-de-robots-blandos-1757164791>

Vergara, A. (2015). Diseño y Fabricación de Robots Modulares Blandos. Universidad de Chile, 10.

ANEXOS

ANEXO A PLANOS DE CONJUNTO Y DESPIECE DE PINZA FLEXIBLE

ANEXO B PLANOS DE CONJUNTO Y DESPIECE DE MODULO
CLASIFICADOR

ANEXO C CÓDIGO PROGRAMACIÓN BRAZO ROBÓTICO

ANEXO D CÓDIGO DE SISTEMA DE CONTROL DE MODULO
CLASIFICADOR

ANEXO E CÓDIGO EN PYTHON DETECCIÓN COLORES HSV

ANEXO F CÓDIGO EN PYTHON CLASIFICACIÓN POR VISIÓN
ARTIFICIAL

ANEXO G TABLA DE DISTRIBUCION CHI-CUADRADO

ANEXO H MANUAL DE USUARIO

ANEXO I PAPER



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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores:

**XAVIER ALEJANDRO NARANJO VALLEJO y JOSSBELL FABIÁN
TELLO CORDONES**

En la ciudad de Latacunga, a los 14 días del mes de octubre del 2017

Aprobado por:

Ing. Andrés Gordon

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADEMICO