



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR Y DE
UNA APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN, ENSAMBLE Y
PALETIZACIÓN PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO
ANTROPOMÓRFICO SAINSMART DE LA EMPRESA ACINDEC S.A**

AUTOR: SANTACRUZ SAMPEDRO DAYANA NATHALY

DIRECTOR: ING. IBARRA JÁCOME OSWALDO ALEXANDER

SANGOLQUÍ

2017



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR Y DE UNA APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN, ENSAMBLE Y PALETIZACIÓN PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO ANTROPOMÓRFICO SAINSMART DE LA EMPRESA ACINCEC S.A**”, realizado por la señorita **Dayana Nathaly Santaruz Sampedro**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requerimientos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **Dayana Nathaly Santaruz Sampedro** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 3 de Marzo del 2017

Ing. Oswaldo Alexander Ibarra Jácome

DIRECTOR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Dayana Nathaly Santacruz Sampedro** con cédula de identidad N° 1721190732, declaro que este trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR Y DE UNA APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN, ENSAMBLE Y PALETIZACIÓN PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO ANTROPOMÓRFICO SAINSMART DE LA EMPRESA ACINCEC S.A”**, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en citas bibliográficas.

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

Sangolquí, 3 de Marzo del 2017

Dayana Nathaly Santacruz Sampedro

CC: 1721190732



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

AUTORIZACIÓN

Yo, Dayana Nathaly Santacruz Sampedro, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR Y DE UNA APLICACIÓN DE CLASIFICACIÓN, ENSAMBLE Y PALETIZACIÓN PARA EL MANIPULADOR ROBÓTICO ANTROPOMÓRFICO SAINSMART DE LA EMPRESA ACINCEC S.A”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 3 de Marzo del 2017

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Dayana Santacruz', is written over a horizontal line.

Dayana Nathaly Santacruz Sampedro

CC: 1721190732

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi novio Christopher y a mis pequeños Takoda y Zuko, quienes día a día llenan de alegría mi vida y me brindan su amor, han estado a mi lado todo el tiempo y han vivido junto a mí todo el proceso de esta última etapa que conlleva a culminar mi carrera.

El apoyo incondicional y la ayuda desinteresada por parte de Christopher me han dado la fuerza para vencer los obstáculos y con esfuerzo y sacrificio he logrado llegar hasta este punto de cierre que un día lo creí muy lejano, y que sin él no lo hubiese logrado. Y aunque las palabras no alcanzan y no logran expresar todo el agradecimiento que le tengo por todo lo que ha hecho por mí para poder llegar a ser una profesional, igualmente le digo: Gracias amor por todo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por las amistades, vivencias, aprendizajes y circunstancias que me han permitido llegar hasta este punto del camino; a mis padres por su sacrificio, apoyo y palabras de aliento que me han animado a continuar; a mis amigos y familiares que me han acompañado durante este trayecto brindándome alegrías; y sobre todo agradezco a mi novio Christopher por su cariño, paciencia y apoyo incondicional que me ha dado la fuerza para no flaquear y lograr culminar esta etapa en mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
<i>GENERALIDADES</i>	<i>1</i>
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Definición del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Alcances	4
1.5.1. Componentes mecánicos	4
1.5.2. Componentes electrónicos	5
1.5.3. Sistema de control	6
CAPÍTULO II	7
<i>MARCO TEÓRICO</i>	<i>7</i>
2.1. Robots de paletización.....	7
2.2. Visión artificial.....	10
2.2.1. Etapas de un sistema de visión artificial	12
2.2.2. Componentes de un sistema de visión artificial	13
2.2.3. Visión artificial como complemento de un sistema de paletizado	14
2.3. Interacción tarjeta microcontrolada y cámara	15

2.3.1.	Tarjeta microcontrolada	15
2.3.2.	Cámara	16
2.3.3.	Circuito de interface	16
2.4.	Módulo Ethernet	17
2.4.1.	Protocolo de comunicación Ethernet	18
2.5.	Cinemática de brazos robóticos.....	19
2.5.1.	Cinemática Inversa	19
2.5.2.	Cinemática Directa.....	20
CAPÍTULO III.....		24
<i>DISEÑO</i>		24
3.1.	Diseño mecánico	24
3.1.1.	Análisis cinemático del robot antropomórfico de 4 GDL	24
3.1.2.	Diseño del módulo de aplicación	31
3.2.	Diseño electrónico	81
3.2.1.	Diagrama de bloques.....	81
3.2.2.	Selección de elementos.....	82
3.2.3.	Descripción de los bloques del hardware	86
3.3.	Diseño de control	95
3.3.1.	Diagrama de flujo General	95
3.3.2.	Diagrama de flujo Control por Articulaciones.....	96
3.3.3.	Diagrama de flujo Control por Ejes XYZ	97
3.3.4.	Diagrama de flujo Control Manual	98
3.3.5.	Diagrama de flujo Aplicación	99
CAPÍTULO IV		102
<i>IMPLEMENTACIÓN</i>		102
4.1.	Implementación mecánica	102
4.1.1.	Módulo de aplicación	102
4.1.2.	Rodillos	103
4.2.	Implementación electrónica	112
4.2.1.	Tarjeta de alimentación.....	113
4.2.2.	Interfaz de control brazo robótico	114
4.2.3.	Control manual	115
4.2.4.	Tarjeta de I/O de la aplicación	116
4.3.	Implementación del control	117
4.3.1.	HMI Web.....	117
4.3.2.	Software de control.....	121
4.3.3.	Firmware de control	123
4.3.4.	Cámara para visión artificial.....	126
CAPÍTULO V		130
<i>PRUEBAS Y RESULTADOS</i>		130
5.1.	Pruebas	130

5.1.1. Precisión de los ángulos de las articulaciones del brazo robótico	130
5.1.2. Precisión de las coordenadas XYZ del TCP del brazo robótico	131
5.1.3. Velocidad de trabajo	132
5.1.4. Detección de objetos con cámara PIXY.....	134
5.2. Resultados.....	134
5.2.1. Precisión de los ángulos de las articulaciones del brazo robótico	134
5.2.2. Precisión de las coordenadas XYZ del TCP del brazo robótico	152
5.2.3. Velocidad de trabajo	157
5.2.4. Detección de objetos con cámara PIXY.....	160
CAPÍTULO VI	163
<i>ANÁLISIS DE COSTOS</i>	<i>163</i>
6.1. Costos de materiales	163
6.1.1. Materiales mecánicos	163
6.1.2. Materiales electrónicos	164
6.2. Costos de diseño	165
6.2.1. Diseño mecánico	165
6.2.2. Diseño electrónico	166
6.2.3. Desarrollo de software	166
6.3. Costos de implementación.....	166
6.4. Costo total.....	167
CAPÍTULO VII	168
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	<i>168</i>
7.1. Conclusiones	168
7.2. Recomendaciones	170
BIBLIOGRAFÍA	171
ANEXOS	173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Selección del material de la cinta para la banda transportadora.....	31
Tabla 2	Selección del material para las estructura de todo el sistema que conforma la banda transportadora.	32
Tabla 3	Selección del material para las piezas que serán tomadas por el brazo robótico, caja de desecho y palets.	32
Tabla 4	Selección del tipo de rodamiento para la sujeción entre los rodillos y su eje.	33
Tabla 5	Selección del material de los ejes de los rodillos.	33
Tabla 6	Selección de los motores que formarán parte del sistema de banda transportadora.....	34
Tabla 7	Coeficiente de fricción (f) de las partes móviles.....	41
Tabla 8	Coeficiente de fricción según la superficie de tambor " μ ".	42
Tabla 9	Ángulos de abrace dependiendo de las diferentes configuraciones.....	43
Tabla 10	Selección de los sensores para la detección de piezas.....	83
Tabla 11	Selección del tipo de comunicación con la HMI.	83
Tabla 12	Selección de los módulos para el control.....	84
Tabla 13	Selección de los módulos para el control.....	84
Tabla 14	Selección de la cámara para monitoreo.....	85
Tabla 15	Características generales de la PIXY CMUcam.....	126
Tabla 16	Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo "0°".....	134
Tabla 17	Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo "90°".....	136
Tabla 18	Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo "135°".....	137
Tabla 19	Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo "15°".	139
Tabla 20	Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo "90°".	140

Tabla 21	Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo “115°”	142
Tabla 22	Datos obtenidos del servo del codo con ángulo “0°”	143
Tabla 23	Datos obtenidos del servo del codo con ángulo “90°”	145
Tabla 24	Datos obtenidos del servo del codo con ángulo “115°”	146
Tabla 25	Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo “0°”	148
Tabla 26	Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo “45°”	149
Tabla 27	Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo “90°”	151
Tabla 28	Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (12,15, 8).	152
Tabla 29	Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (10, 0,15).	154
Tabla 30	Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (-18,11, 20).	155
Tabla 31	Selección de la velocidad de trabajo del brazo.	157
Tabla 32	Selección de la velocidad de trabajo del gripper.	158
Tabla 33	Selección de la velocidad de trabajo del sistema de empuje..	158
Tabla 34	Selección de la velocidad de trabajo del sistema de elevación.	159
Tabla 35	Selección de la velocidad de trabajo de la banda	159
Tabla 36	Datos de dimensiones de piezas correctas con la PIXY.	160
Tabla 37	Datos de dimensiones de piezas defectuosas con la PIXY. ...	161
Tabla 38	Costo de materiales mecánicos.	163
Tabla 39	Costo de materiales electrónicos.	164
Tabla 40	Costos de implementación.	166
Tabla 41	Costo total del proyecto.	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Dimensiones Brazo Robótico Antropomórfico de 4GDL.	2
Figura 2	Sistema de paletizado automático tradicional.	8
Figura 3	Sistema de paletizado robótico – Robot Pórtico.	9
Figura 4	Sistema de paletizado robótico – Robot Articulado.....	10
Figura 5	Etapas de un sistema de visión artificial.	12
Figura 6	Elementos de un sistema de visión artificial.	14
Figura 7	Módulo Ethernet.....	18
Figura 8	Cable Ethernet.....	19
Figura 9	Determinación de los parámetros D-H.....	22
Figura 10	Representación de la cadena cinemática.	25
Figura 11	Representación geométrica del brazo robótico en tres dimensiones.....	26
Figura 12	Representación geométrica del brazo robótico en dos dimensiones.....	27
Figura 13	Representación gráfica del volumen de trabajo del brazo robótico- vista superior.....	30
Figura 14	Representación gráfica del volumen de trabajo del brazo robótico- vista lateral.....	30
Figura 15	Rueda de eje y de rodamiento	36
Figura 16	Rodillo para banda transportadora.....	36
Figura 17	Tensiones y ángulos de abrace máximo en el tambor motriz. ...	37
Figura 18	Distribución de fuerzas a lo largo de una banda transportadora.....	38
Figura 19	Tensiones cuando el tambor motriz está en la cola.	41
Figura 20	Diagrama de la banda transportadora.	44

Figura 21	Ensamble de rodillos y banda.....	47
Figura 22	Soportes laterales de la banda transportadora.....	50
Figura 23	Soporte frontal de la banda transportadora.....	50
Figura 24	Sujetador de los laterales del soporte de la banda transportadora.....	51
Figura 25	Base para servomotor.....	51
Figura 26	Ensamble soporte banda transportadora.....	51
Figura 27	Análisis de esfuerzos al soporte banda transportadora.....	52
Figura 28	Factor de seguridad del soporte banda transportadora.....	52
Figura 29	Pieza “A”.....	53
Figura 30	Pieza “B”.....	53
Figura 31	Diagrama de distribución de fuerzas sobre dispensador piezas A.....	54
Figura 32	Sección transversal dispensador piezas A.....	55
Figura 33	Diagrama de cortante y momento.....	56
Figura 34	Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “A” de 2mm de espesor.....	57
Figura 35	Frontal inferior del dispensador piezas “A”.....	58
Figura 36	Frontal superior del dispensador piezas “A”.....	58
Figura 37	Laterales del dispensador piezas “A”.....	59
Figura 38	Posterior del dispensador piezas “A”.....	59
Figura 39	Base para las piezas “A”.....	60
Figura 40	Soporte para servomotor.....	60
Figura 41	Ensamble dispensador pieza “A”.....	60
Figura 42	Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “A” de 6mm de espesor.....	61

Figura 43	Eslabones para el sistema de empuje.	62
Figura 44	Partes de la Corredera para el sistema de empuje.....	62
Figura 45	Ensamble sistema de empuje.....	63
Figura 46	Análisis de esfuerzos en eslabón crítico del sistema de empuje.	63
Figura 47	Análisis de fatiga- porcentaje de daño del eslabón crítico del sistema de empuje.....	64
Figura 48	Análisis de fatiga- ciclos de vida del eslabón crítico del sistema de empuje.....	64
Figura 49	Diagrama de distribución de fuerzas sobre dispensador piezas B.	65
Figura 50	Sección transversal dispensador piezas B.	66
Figura 51	Diagrama de cortante y momento.....	67
Figura 52	Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “B” de 2mm de espesor.	68
Figura 53	Laterales del dispensador piezas “B”.....	69
Figura 54	Frontal y Posterior del dispensador piezas “B”.	69
Figura 55	Soporte para servomotor.	70
Figura 56	Ensamble dispensador piezas “B”.	70
Figura 57	Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “B” de 6mm de espesor.	71
Figura 58	Ruedas que conforman la polea motriz.	72
Figura 59	Base para las piezas B.	72
Figura 60	Ensamble sistema de elevación.....	72
Figura 61	Distribución de tenciones sobre el sistema de elevación.....	73
Figura 62	Diagrama de cuerpo libre en condiciones estacionarias.....	74
Figura 63	Base para las piezas del módulo de aplicación.	76

Figura 64	Contenedor de desecho.....	77
Figura 65	Diseño de Palet.....	77
Figura 66	Laterales para la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.....	78
Figura 67	Tapa para la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.	78
Figura 68	Ensamble de la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.....	79
Figura 69	Laterales para la caja del control manual.	79
Figura 70	Base para la caja del control manual.	80
Figura 71	Tapa para la caja del control manual.	80
Figura 72	Ensamble de la caja del control manual.	80
Figura 73	Ensamble final del módulo de aplicación.	81
Figura 74	Diagrama de bloques del hardware.	82
Figura 75	Diagrama esquemático de la tarjeta de alimentación.	88
Figura 76	Diagrama esquemático de la tarjeta de interfaz.....	90
Figura 77	Diagrama esquemático del control manual.....	92
Figura 78	Diagrama esquemático de la tarjeta de I/O de la aplicación.	94
Figura 79	Layout de las partes que componen el módulo aplicación.....	102
Figura 80	Pieza en acrílico del módulo de aplicación.	103
Figura 81	Ensamble rodillos, rodamientos y eje.	103
Figura 82	Cinturón de seguridad como cinta para la banda transportadora.....	104
Figura 83	Ensamble entre rodillos y banda transportadora.....	104
Figura 84	Ensamble final banda transportadora.	105
Figura 85	Piezas “A” y “B” armadas y pulidas.	105
Figura 86	Piezas “A” y “B” pintadas.	106
Figura 87	Ensamble sistema de empuje.....	106

Figura 88	Ensamble final dispensador piezas “A”	107
Figura 89	Ensamble sistema de elevación por poleas	108
Figura 90	Ensamble final dispensador piezas “B”	109
Figura 91	Ensamble final del módulo de aplicación	110
Figura 92	Contenedor de desecho.....	110
Figura 93	Palet.....	111
Figura 94	Caja de la tarjeta I/O de la aplicación.	111
Figura 95	Caja del control manual.	112
Figura 96	Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de alimentación.....	113
Figura 97	Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de alimentación. .	113
Figura 98	Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de interfaz de control.	114
Figura 99	Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de interfaz de control.....	114
Figura 100	Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta del control manual.	115
Figura 101	Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta del control manual.....	115
Figura 102	Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de I/O de la aplicación.	116
Figura 103	Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de I/O de la aplicación.....	116
Figura 104	Página principal de la HMI.	117
Figura 105	Menú de funciones de la HMI.	118
Figura 106	Interfaz para el control por articulaciones.	119
Figura 107	Interfaz para el control por ejes.....	120

Figura 108 Interfaz para la activación y desactivación del control manual.	120
Figura 109 Interfaz para el control de la aplicación demostrativa.	121
Figura 110 Módulo Ethernet-Arduino	124
Figura 111 PIXY CMUcam.....	127
Figura 112 Piezas azul y roja detectadas con la PIXY cam.	128
Figura 113 Detección de piezas errónea con la PIXY cam.	129
Figura 114 Detección de piezas defectuosa con la PIXY cam.....	129
Figura 115 Medición de ángulos	130
Figura 116 Medición de coordenadas.....	131

RESUMEN

El presente proyecto fue propuesto por la empresa ACINDEC S.A. por parte de su departamento de Investigación y Desarrollo con el fin de implementar un controlador y una aplicación demostrativa para un brazo robótico antropomórfico, el cual fue adquirido por la empresa tiempo atrás, su intención con la implementación de este proyecto es que en un futuro este le brinde un mayor nivel tecnológico frente a sus clientes. El hardware del controlador permitirá variar el ángulo de giro de los servomotores que se encuentran en cada articulación del robot de acuerdo a los resultados provenientes del software de control el cual estará encargado de realizar los cálculos matemáticos correspondientes según las coordenadas XYZ ingresadas por el usuario o requeridas por la aplicación para cumplir su trayectoria de trabajo. El manipulador será controlado por el usuario mediante un HMI web en el cual se podrá seleccionar los tipos de control del brazo, ya sea el control por articulaciones en el cual el usuario podrá variar el ángulo de cada articulación independientemente, control por ejes en el cual podrá mover la herramienta del robot a lo largo de los ejes XYZ, control manual el cual permite controlar las articulaciones del robot mediante un teclado físico, o aplicación demostrativa que permite ejecutar la aplicación demostrativa diseñada e implementada en el presente proyecto. La aplicación a ser desarrollada consiste en un proceso de clasificación mediante visión artificial, ensamblaje y paletización de piezas de diferentes colores incluyendo también detección y desecho de piezas erróneas.

Palabras clave:

- HMI
- BRAZO ROBÓTICO
- CINEMÁTICA
- VISIÓN ARTIFICIAL

ABSTRACT

The present project was proposed by the company ACINDEC S.A. by its Research and Development Department in order to implement a controller and a demonstration application for an anthropomorphic robotic arm, which was purchased by the company some time ago, their intention with the implementation of this project is that in future it will provide a higher level of technology to its customers. The hardware of the controller allow to adjust the rotation angle of the servomotors that are in each articulation of the robot according to the results coming from the control software which will perform the corresponding mathematical calculations taking the XYZ coordinates entered by the user or required by the application to fulfill their work trajectory. The manipulator will be controlled by the user through a web HMI selecting the arm's needed type of control, it can be by joints in which the user can vary the angle of each joint independently, control by axes in which the user can move the robot tool along the XYZ axis, manual control which allows control of the joints of the robot through a physical keyboard, or demonstration application that allows to execute the demo application designed and implemented in the present project. The application developed consists of a process of classification by artificial vision, assembly and palletization of different color pieces including also detection and disposal of wrong pieces.

Key Words:

- HMI
- ROBOTIC ARM
- KINEMATICS
- ARTIFICIAL VISION

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La empresa ACINDEC S.A. se dedica a la manufactura de tanques, equipos industriales y automatización de procesos; y actualmente tiene como proyecto interno por parte de su Departamento de Investigación y Desarrollo la realización de un prototipo de Brazo Robótico de Clasificación y Paletización automática, del cual, se pretende que en un futuro le brinde un mayor nivel tecnológico a la empresa.

El brazo robótico a ser utilizado para el prototipo tiene una arquitectura antropomórfica de 4 grados de libertad, sus partes son de PVC procesadas en CNC, las cuales, ensambladas reproducen la estructura a escala de un brazo robótico de paletizado estándar, incluye servomotores para cada articulación y un gripper tipo pinza, sin embargo no incluye ningún controlador ni otro hardware o software adicionales.

Este brazo es de la marca SAIN SMART la cual se especializa en sensores y elementos de robótica y control, y fue adquirido e importado de EEUU hace algún tiempo atrás.



Figura 1: Dimensiones Brazo Robótico Antropomórfico de 4GDL.

Fuente: Sainsmart (2010-2016). *Palletizing Robot Arm Model*, recuperado 2016/2017, de <https://www.sainsmart.com/robotics/robot-arm/diy-4-axis-servos-control-palletizing-robot-arm-model-for-arduino-uno-mega2560.htm>

1.2. Definición del problema

Los miembros del departamento de Investigación y Desarrollo de la empresa ACINDEC S.A ya han venido trabajando sobre el prototipo robótico de paletizado por algún tiempo; sin embargo, éste no ha podido ser finalizado debido a varios factores, como por ejemplo, la carga de trabajo de los empleados del área así como su limitado conocimiento en los cálculos y programación de robótica lo cual ha frenado el avance en el desarrollo de esta aplicación que resulta de gran importancia para la empresa por lo que es imperativa la actuación de personal instruido en el tema para su oportuna y correcta culminación, razón por la cual se plantea diseñar el respectivo sistema de posicionamiento y control del prototipo como parte del presente proyecto de titulación con lo cual éste quedará

funcional y se lo completará con la implementación de una aplicación de clasificación mediante visión artificial, ensamble y paletización, la cual fue solicitada por la empresa.

1.3. Justificación

Los directivos de la empresa ACINDEC S.A. por medio del prototipo manipulador robótico de paletización desean mostrar a sus clientes que se tiene la capacidad de desarrollar proyectos pick and place y de visión artificial en el país, para que en un futuro, este tipo de tecnología sea tomada en cuenta por las diferentes compañías a las que prestan su servicio de manufactura y automatización, y desarrollarla a nivel industrial, lo cual ampliaría el área de trabajo de la empresa así como la productividad de sus clientes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar un controlador y una aplicación de clasificación ensamble y paletización para el manipulador robótico antropomórfico SAIN SMART de la empresa ACINDEC S.A.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un controlador con conectividad web para el manipulador robótico utilizando una tarjeta microcontrolada y un módulo ETHERNET.

- Diseñar e implementar la circuitería de acoplamiento entre el controlador y los sensores y actuadores del sistema incluyendo elementos de seguridad.
- Diseñar un software de control y entorno HMI para el control del manipulador y ejecución de la aplicación el cual sea accesible a través de la red LAN de la empresa.
- Diseñar e implementar una aplicación demostrativa para el manipulador robótico la cual consista en un proceso de clasificación, ensamble y paletización utilizando visión artificial.
- Diseñar y fabricar los objetos y mecanismos que intervendrán en el proceso de la aplicación a ser diseñada.

1.5. Alcances

1.5.1. Componentes mecánicos

Se diseñarán y fabricarán las piezas y mecanismos necesarios para el desarrollo de la aplicación del manipulador robótico los cuales son:

- Piezas “A”.- son las piezas de mayor tamaño las cuales contarán con un agujero en la parte superior de estas para el ensamble de la pieza “B”.
- Piezas “B”.- son piezas de menor tamaño las cuales serán ensambladas dentro del agujero de las piezas “A”.
- Palets.- serán diseñadas para recibir cuatro piezas ensambladas, habrá una por cada color.
- Sistema de empuje.- sistema motorizado que empujará las piezas “A” desde su contenedor hacia la banda transportadora.
- Contenedor piezas “A”.- contenedor tipo torre en el cual se encontrarán las piezas “A”.

- Dispensadores piezas “B”.- contenedores tipo torre en las cuales se encontraran las piezas “B”, estos contenedores contarán con plataformas motorizadas que elevarán las piezas “B” hasta el alcance del gripper.
- Contenedor de desecho.- contenedor tipo caja que recibirá las piezas erróneas al final de la banda transportadora.
- Banda transportadora.- transportará las piezas “A” desde su contenedor hacia cada etapa del proceso de aplicación.

Posteriormente se desarrollará los cálculos matemáticos de la cadena cinemática del brazo robótico, necesarios para el respectivo control a ser diseñado.

1.5.2. Componentes electrónicos

Se utilizarán servomotores para el movimiento de cada articulación y la apertura y cierre del efector final del prototipo robótico, estos ya se encuentran acoplados al mismo, una cámara para el sistema de visión artificial, módulos microcontrolados como tarjeta de adquisición de datos de la cámara y tarjeta de control, además se contará con un módulo ethernet directamente acoplado a la tarjeta de control para su comunicación con la HMI web de control del prototipo.

Se realizará el diseño y fabricación del circuito electrónico de interfaz y de ser necesario un circuito de protección que incluirá el acople seguro entre el controlador y los servomotores del manipulador por medio de opto-acopladores, esto dependiendo del hardware de control que se escoja, un circuito de alimentación el cual contendrá un botón de paro de emergencia, interruptor de encendido y apagado del sistema, el circuito del módulo de aplicación que incluirá conexión para sensores, además de los

motores para el control de la banda transportadora, sistemas de empuje y elevación; finalmente se realizará el cableado y montaje del todo el sistema.

El sistema será energizado mediante una fuente de alimentación comercial.

1.5.3. Sistema de control

Se diseñará un control robótico mediante cálculos cinemáticos de la estructura del robot, por medio del método más idóneo para su implementación en el controlador.

Se realizará el diseño de la HMI web para que cumpla con las funciones solicitadas por la empresa, la cual contendrá los siguientes modos de operación:

- *Menú Web:*
 - Control por articulaciones (mover articulaciones independientemente)
 - Control por ejes (mover herramienta en base a coordenadas XYZ)
 - Activar control manual (mover articulaciones independientemente mediante pulsadores físicos)
 - Ejecución del ejemplo de aplicación

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Robots de paletización

La paletización es considerada como una de las mejores prácticas de los procesos logísticos en las industrias, debido a que permite mejorar el desempeño de las actividades de carga, movimiento, almacenamiento y descarga de la mercancía optimizando de esta forma el uso de recursos y la eficiencia de los procesos de la Cadena de Abastecimiento.

A partir los años 50 se introdujeron sistemas automáticos de paletizado en los procesos productivos en las que no requiere la manipulación o la intervención de humanos; obteniendo excelentes resultados con los sistemas automáticos, en los años 90 se introducen en las industrias sistemas robóticos para paletización, iniciando con robots pórticos y luego con brazos articulados logrando importantes avances en el paletizado.

Los sistemas de paletizado automáticos tradicionales son idóneos para aquellas líneas de producción de alta velocidad como son las industrias de alimentos, bebidas y bienes de consumo.



Figura 2: Sistema de paletizado automático tradicional.

Fuente: Bracker, *Paletizadora*, recuperado 2016/2017, de <http://bracker.cl/portfolio-item/mantequilla-manteiga/>

Los sistemas robóticos de paletizado ocupan menos espacio que los sistemas automáticos tradicionales y se puede adaptar fácilmente a diferentes modos de distribución de los productos en el palet y tipos de productos, incluso pueden manipular simultáneamente múltiples cargas de variedad de productos, entre ellos, bolsas, cajas, cubos, botellas, otros. Además, los sistemas robóticos son, por lo general, menos complejos a nivel mecánico que los sistemas automáticos, y requieren menos mantenimiento por lo que tienen menos probabilidades de presentar alguna falla.

- *Los robots pórticos (robots cartesianos)* ofrecen un desplazamiento lineal en triaxial x , y , z . Con esta configuración se logra disponer de una mayor cantidad de estaciones de paletizado, permitiendo paletizar más objetos sobre un mismo espacio con un solo robot. Según los recorridos a realizar varía el número de ciclos, dimensiones producto y tipo de distribución, entre otros, brindando este robot mucha flexibilidad en su espacio útil de trabajo.



Figura 3: Sistema de paletizado robótico – Robot Pórtico.

Fuente: Direct Industry, *Paletizador de pórtico*, recuperado 2016/2017, de <http://www.directindustry.es/prod/project-automation-engineering-gmbh/product-155131-1595879.html>

- *Los robots articulados (robots antropomórficos)* son adecuados para aquellas aplicaciones donde se requiere que el robot reciba sacos de varias líneas a la vez, o que confeccione varios palets simultáneamente; los palets se dispone alrededor del manipulador robótico, y no linealmente como es el caso en los robots pórticos.

Estos robots presentan gran rapidez y maniobrabilidad, permitiendo la ejecución de trayectorias complicadas lo que facilita el acceso a sitios obstaculizados.



Figura 4: Sistema de paletizado robótico – Robot Articulado.

Fuente: Webster Griffin, (2105), *Robot palletizing System*, recuperado 2016/2017, de <http://www.webstergriffin.com/Our-Machines/Robot-Palletizing-Systems>

2.2. Visión artificial

La visión artificial siendo parte de la inteligencia artificial permite la obtención, proceso y posterior análisis de cualquier clase de información específica obtenida partiendo de imágenes digitales, en otras palabras, su objetivo es modelar matemáticamente la información visual recibida por los seres vivos, para que mediante la ejecución de programas ésta sea procesada y utilizada dentro de una tarea o proceso. Las imágenes obtenidas son monocromáticas o de color y se toman por medio de una o más cámaras, ya sean cada una de estas estacionarias o móviles.

Con la visión artificial se intenta detectar automáticamente la estructura y diferentes propiedades de objetos pertenecientes a un entorno tridimensional basándose en imágenes de dos dimensiones, como son las características geométricas (forma, tamaño, ubicación del objeto u otros), las características del material (textura, color, composición, etc.), la oscuridad o luminosidad de las superficies, entre otros.

La visión artificial a nivel industrial integra la mecánica, informática, automatización industrial y la óptica, para que en las aplicaciones se fusionen tecnologías de captura de imagen digital con dispositivos de entrada/salida y redes de computadoras lo que permita el control de los equipos que intervienen en el proceso productivo, como son los brazos robóticos.

Los sistemas de Visión Artificial son enfocados a realizar inspecciones visuales que deban ser ejecutadas a alta velocidad, que posean un potente aumento, funcionamiento continuo durante todo el día, repetibilidad de las mediciones, etc, para comprobar los requerimientos de una pieza, tales como sus dimensiones, números de serie, la presencia o no de componentes, etc.

Las principales aplicaciones de la visión artificial son:

- Control de procesos
 - Forma o apariencia
 - Control por colores
 - Reconocimiento de piezas o componentes del producto
 - Reconocimiento de caracteres
- Control de calidad
 - Detección de defectos
 - Medidas unidimensionales o bidimensionales
- Aplicaciones no industriales
 - Guiado predeterminado
 - Guiado continuo

2.2.1. Etapas de un sistema de visión artificial

Un sistema de visión artificial se compone de un grupo de subsistemas que realizan las tareas de adquisición de aplicación y análisis de aplicación.



Figura 5: Etapas de un sistema de visión artificial.

- *Adquisición de imágenes:* Es el conjunto de operaciones que se llevan a cabo para transformar la información luminosa de una imagen en una señal digital. Este proceso permite almacenar esta imagen en el disco de forma digitalizada. Las operaciones fundamentales en la adquisición de imágenes son:
 - *Iluminación:* Adquisición de la imagen a través de un sensor (transforma información luminosa en eléctrica analógica) y su óptica asociada (lente).
 - *Digitalización:* es la conversión analógica-digital de la información (la señal eléctrica analógica se transforma en digital).
- *Análisis de la imagen:* El análisis de una imagen abarca todos los procesos que permiten la extracción de una información

específica (tamaño, posición, etc) de los elementos que forman parte de la imagen. Estos procesos se pueden abarcar en cuatro fases:

- Pre-procesado: Mejoramiento de la imagen digitalizada para mayor facilidad en su análisis
- Segmentación: división de una escena en objetos para su posterior análisis e identificación.
- Descripción: extracción de las características de un objeto para su identificación.
- Reconocimiento: Identificación de cada objeto extraído en función de características previamente conocidas (inteligencia artificial).

2.2.2. Componentes de un sistema de visión artificial

Un sistema de visión artificial está compuesto en general de estos elementos:

- *Fuente de luz*: proporciona condiciones de iluminación uniformes e independientes del entorno.
- *Sensor de imagen*: recopila las propiedades del objeto que se estudia.
- *Tarjeta de captura o adquisición de imágenes*: es la interfaz entre el sensor y la computadora.
- *Algoritmos de análisis de imagen*: aplica las transformaciones de la imagen y extrae los datos requeridos por la aplicación.
- *Computadora o módulo de proceso*: sistema que analiza las imágenes receptadas por el sensor para extraer los datos requeridos, implementando y ejecutando los algoritmos diseñados para la aplicación.

- *Sistema de respuesta en tiempo real:* toma de decisiones de acuerdo con la información extraída.

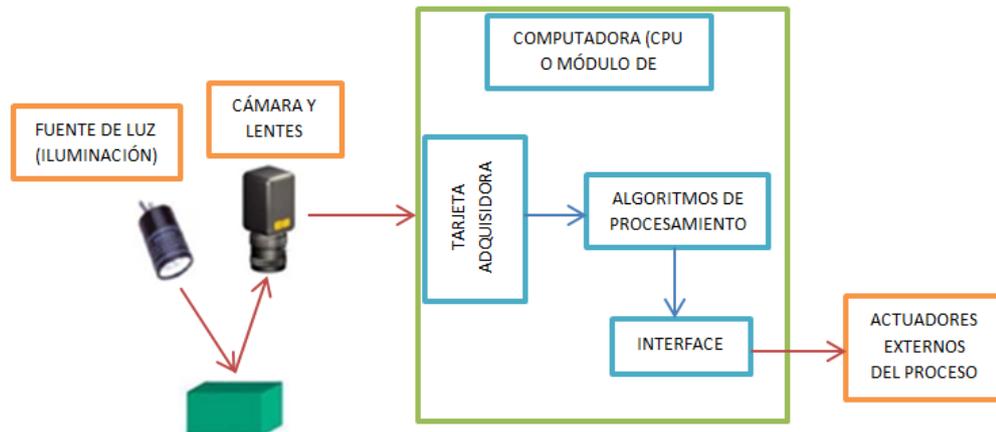


Figura 6: Elementos de un sistema de visión artificial.

2.2.3. Visión artificial como complemento de un sistema de paletizado

Dentro de todas las aplicaciones robóticas industriales, entre ellas el paletizado, los sistemas robotizados se pueden complementar con puestos de visión artificial de ser requerido. Los sistemas de visión artificial que se integran en estaciones robotizadas se utilizan en gran medida para las siguientes aplicaciones:

- *Medición:* Mide las dimensiones de una pieza, acabado de superficies, nivel.
- *Guiado:* Guía a los robots para ubicar o ensamblar elementos, guía el recorrido de materiales en rollos.
- *Identificación:* Identifica piezas o productos por sus características o caracteres etiquetados en ellos.

- *Inspección*: Detecta la presencia o ausencia de elementos en ensamblaje, realiza la orientación de piezas, las verificación de defectos.

Además los sistemas de visión artificial son de gran ayuda en los *Controles de Calidad* de los procesos productivos.

2.3. Interacción tarjeta microcontrolada y cámara

2.3.1. Tarjeta microcontrolada

Una tarjeta microcontrolada es un circuito electrónico que tiene como núcleo un microcontrolador (generalmente pic o avr), el cual es diseñado para realizar una tarea específica, por ejemplo adquisición y/o acondicionamiento de señales, control de actuadores, control de motores, interfaz de comunicaciones, o en ocasiones la combinación de varias de estas funciones en una sola tarjeta.

Las tarjetas microcontroladas pueden diseñarse y fabricarse para que sean reprogramables con lo cual se pueden ajustar o cambiar parte o la totalidad de sus funciones, permitiendo flexibilidad en su uso pero con mayores costos, generalmente este tipo de tarjetas son usadas a nivel académico o en investigación; también se tienen tarjetas con funciones y programación fijas, es decir, que el funcionamiento y parámetros manejados por el circuito no pueden ser modificados, este tipo de tarjetas se encuentran a nivel de productos terminados en los cuales no hace falta una intervención sobre su circuito y esto los hace más económicos ya que poseen solo los elementos necesarios para su función programada.

2.3.2. Cámara

La cámara captura una imagen proyectada en su sensor y la transfiere a un sistema electrónico. Las cámaras de visión artificial son más tecnológicamente más avanzadas que las convencionales, pudiendo tener un control completo sobre sus parámetros de toma de imagen.

Se clasifican en función de:

- La tecnología del elemento sensor
 - *Cámaras de tubo*: utilizan un material fotosensible que capta la imagen, la cual es leída por un haz de electrones.
 - *Cámaras de estado sólido CCD (Charge Coupled Device)*: utilizan materiales semiconductores fotosensibles para cuya lectura no es necesario un barrido electrónico.
- La disposición física
 - *Cámaras lineales*: Se basan en un sensor CCD lineal.
 - *Cámaras matriciales*: Se basan en un sensor CCD matricial, lo que permite el análisis de imágenes bidimensionales.

2.3.3. Circuito de interface

El circuito interface permite al microcontrolador comunicarse con la cámara y así extraer de ella la información necesaria y almacenarla para su posterior procesamiento por parte de la tarjeta de control la que recibirá los datos por medio de uno de los tipos de comunicación soportados por su microcontrolador.

Los tipos de comunicación que se puede tener con un microcontrolador son:

- *UART* (comunicación serie asíncrona) y *USART* (comunicación serie síncrona y asíncrona), convierten las señales que maneja el microcontrolador en señales compatibles con el protocolo RS232.
- *Puerto Paralelo* conformado por una puerta paralela esclava que permite conectarse con los buses de otros dispositivos.
- *USB (Universal Serial Bus)*, es un bus serie moderno para ser utilizados en los PC's.
- *Bus I2C*, es un bus de comunicación en serie que utiliza dos hilos para transmitir información y un hilo de referencia.
- *SPI (Serial Peripheral Interface)*, usado principalmente para la transferir información entre circuitos integrados en equipos electrónicos.
- *CAN (Controller Area Network)*, permite adaptarse a redes de conexión multiplexadas para el cableado de dispositivos en automóviles.

2.4. Módulo Ethernet

Un módulo Ethernet permite a la placa del controlador conectarse a internet dentro de una red LAN; este se basa en un chip de 17etodolo que ofrece una red (IP) capaz de usar TCP y UDP.



Figura 7: Módulo Ethernet.

Fuente: Tecno tinker, Julio del 2015, *Uso del módulo Ethernet con Arduino*, recuperado 2106/2107, de <http://tecnotinker.blogspot.com/2012/07/uso-del-modulo-ethernet-enc28j60-con.html>

2.4.1. Protocolo de comunicación Ethernet

Es el método más simple, seguro, y económico para montar una red LAN (red de área local) ya que determina los parámetros físicos y eléctricos que debe poseer dicha red; y debido fundamentalmente a su flexibilidad y entre otras características es posible utilizar desde cable coaxial hasta fibra óptica.

Ethernet es un estándar de red que utiliza el método CSMA/CD (Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detector de Colisiones) que mejora significativamente el rendimiento de la conectividad. El estándar que rige algunas de las conexiones Ethernet es conocido como IEEE 802.3, esta norma define, las características eléctricas, longitud, diámetro de los cables, conector, etc.



Figura 8: Cable Ethernet.

Fuente: Master magazine, *Definifcon de Ethetnet*, recuperado 2016/2017, de <http://www.mastermagazine.info/termino/4930.php>

El protocolo Ethernet permite que todas las PC's dentro de una red envíen y reciban datos de una forma en que se evite cualquier tipo de superposición.

2.5. Cinemática de brazos robóticos

La cinemática del robot estudia la geometría de los movimientos de éste en función del tiempo con respecto a un sistema de referencia. Para realizar un análisis cinemático, las fuerzas que generan el movimiento no son consideradas para los cálculos de la posición, velocidad y aceleración del robot, pero se interesa en las relaciones existentes entre la orientación y posición del extremo final del manipulador con los valores de coordenadas que tiene cada articulación.

La cinemática fundamentalmente es de dos tipos, directa e inversa, mediante los cuales se puede resolver la cinemática del robot.

2.5.1. Cinemática Inversa

En la Cinemática Inversa, conociendo la posición y orientación del extremo final del robot, se puede determinar los valores de las

coordenadas articulares del robot para alcanzar determinada localización espacial. Se tiene dos métodos de resolución.

- *Método Geométrico*

Se utilizan para las primeras variables articulares y se resuelve mediante la resolución de triángulos utilizando relaciones geométricas y trigonométricas.

El procedimiento se basa en encontrar un número suficiente de relaciones geométricas en las que intervendrán las coordenadas del extremo del robot, sus coordenadas articulares y las dimensiones físicas de sus elementos.

- *Desacoplamiento Cinemático*

Aplicado en robots de 6 GDL y debido a su complejidad, éste método consiste en separar la orientación y la posición del extremo final del robot como problemas independientes.

Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los 3 últimos ejes (muñeca del robot) calculándose los valores de las tres primeras variables articulares (q_1 , q_2 , q_3) que consiguen posicionar este punto. A partir de los datos de orientación y de los ya calculados (q_1 , q_2 , q_3) se obtiene los valores del resto de las variables articulares.

2.5.2. Cinemática Directa

En la Cinemática Directa, conociendo las medidas de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot, se puede determinar la posición y orientación del extremo final

del éste con respecto a un sistema de referencia. Se tiene dos métodos de resolución.

- *Matrices Homogéneas*

La matriz de transformación homogénea es una matriz 4x4 que permite transformar los movimientos realizados en un sistema de coordenadas en otro; es decir, permite obtener la posición y orientación de cualquier punto del robot o del efector final respecto a un sistema de referencia. La matriz es representada de la siguiente manera.

$$T = \begin{bmatrix} \text{matriz de rotación} & \text{vector de posición} \\ \text{perspectiva} & \text{escalado} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} nx & sx & ax & px \\ ny & sy & ay & py \\ nz & sz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde, \mathbf{n} , \mathbf{s} , \mathbf{a} , son vectores ortogonales unitarios y \mathbf{p} es un vector \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} .

- *Representación Denavit – Hartenberg*

La metodología de Denavit – Hartenberg, es aplicada en robots de cadena cinemática abierta y propone crear una matriz homogénea 4X4 obteniendo ciertos parámetros de articulación y estableciendo un sistema de coordenadas a cada elemento articulado del robot con respecto al sistema de coordenadas del elemento anterior mediante una serie de reglas; para de este

modo lograr obtener el extremo final del robot representado en las coordenadas de referencia.

Los parámetros a obtener con éste método son cuatro, siendo éste el número mínimo de parámetros para configuraciones genéricas, según se muestra en la siguiente figura:

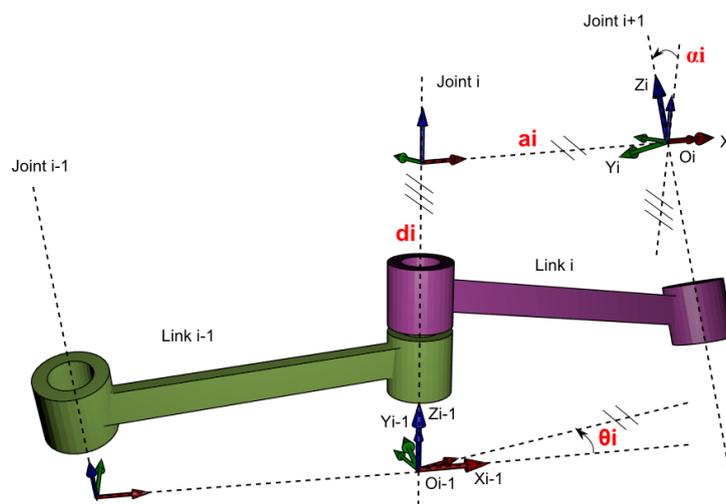


Figura 9: Determinación de los parámetros D-H.

Fuente: Wiki de robotica, *Metodología de Denavit Hartenberg*, recuperado 2016/2107, de <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/22etodología-de-denavit-hartenberg/>

Los parámetros a determinar son:

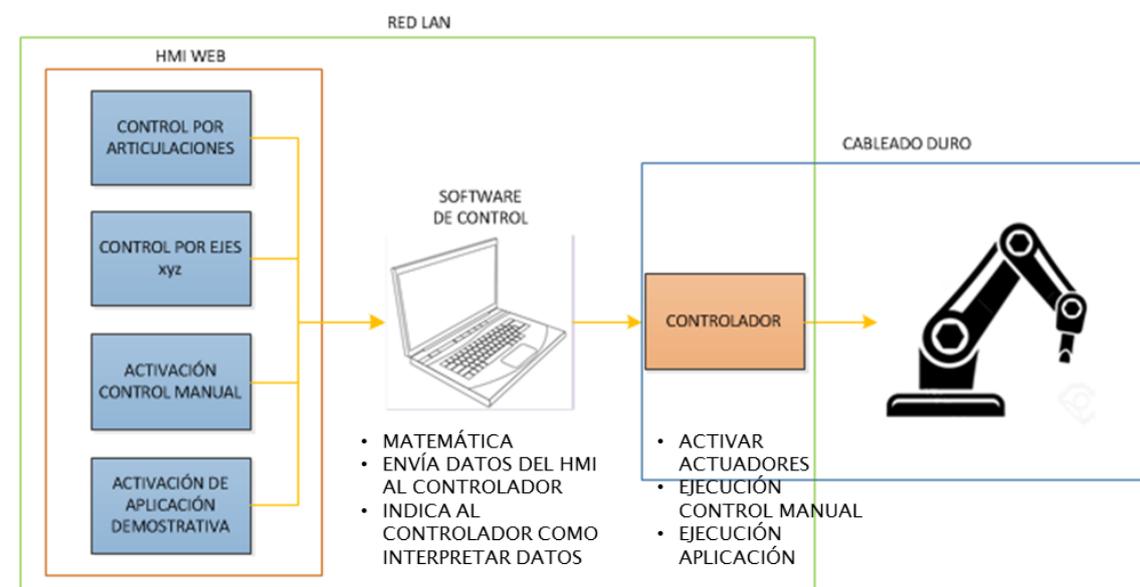
- *Ángulo θ_i* : Es el ángulo desde X_{i-1} hasta X_i girando alrededor de Z_{i-1} .
- *Distancia d_i* : Es la distancia desde el sistema O_{i-1} hasta la intersección de las normales común entre Z_{i-1} y Z_i , a lo largo de Z_{i-1} .
- *Distancia a_i* : Es la longitud de la normal común, es decir, es la distancia de Z_{i-1} a Z_i medida a lo largo de X_i .
- *Ángulo α_i* : Es el ángulo que hay que rotar Z_{i-1} para llegar a Z_i , rotando alrededor de X_i .

Esta secuencia de transformaciones sobre los ejes Z y X define la siguiente matriz de transformación.

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

CAPÍTULO III

DISEÑO



3.1. Diseño mecánico

3.1.1. Análisis cinemático del robot antropomórfico de 4 GDL

3.1.1.1. Características Generales

El manipulador robótico del presente proyecto es de configuración antropomórfica con 4 grados de libertad; al cual se le realizará un análisis cinemático mediante el método geométrico para obtener las relaciones necesarias entre los ángulos de las articulaciones y la posición del efector final; para ello, se representará a cada eslabón de la cadena cinemática como eslabones simples (ver *Figura 10*).

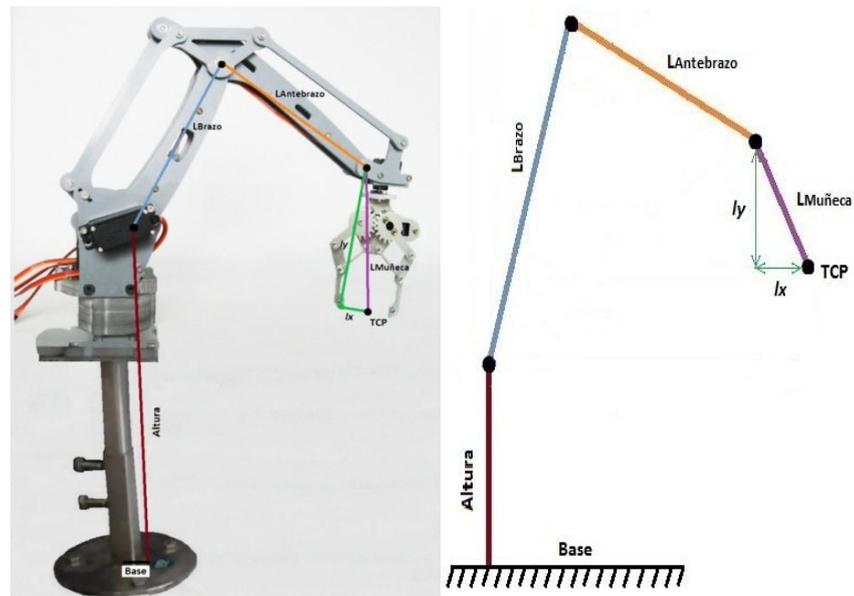


Figura 10: Representación de la cadena cinemática.

3.1.1.2. Resolución por método geométrico

El método geométrico para la obtención de la cinemática inversa utiliza relaciones geométricas y trigonométricas que permiten determinar los ángulos que deben girar cada una de las articulaciones del robot para que el efector final llegue a la posición (X, Y, Z) deseada.

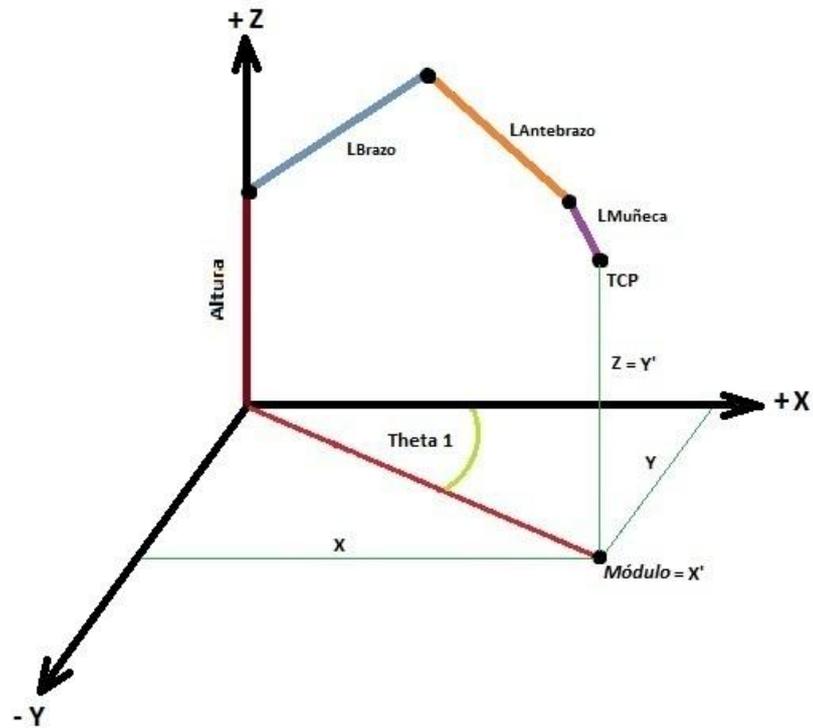


Figura 11: Representación geométrica del brazo robótico en tres dimensiones.

En la representación del brazo robótico en tres dimensiones, como se muestra en la *Figura 11*, se determina el ángulo de giro (θ_1) al cual se lo expresa de la siguiente forma.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

Dónde:

- θ_1 : Ángulo de giro del robot en el plano XY [°]
- Y: Coordenada "y" del TCP del robot [mm]
- X: Coordenada "x" del TCP del robot [mm]

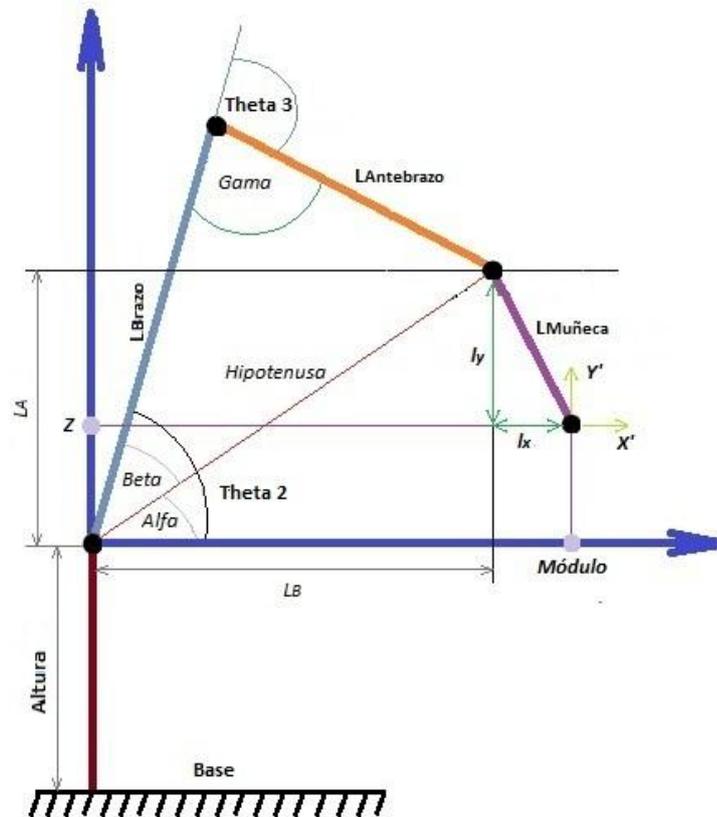


Figura 12: Representación geométrica del brazo robótico en dos dimensiones.

Para obtener los ángulos (θ_2 y θ_3) se representa al brazo robótico en dos dimensiones estableciendo triángulos y ángulos como se indica en la *Figura 12* y con las relaciones trigonométricas y geométricas necesarias se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$y' = Z$$

$$x' = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Dónde:

y' : Coordenada "y" del nuevo plano $x'y'$ [mm]

x' : Coordenada "x" del nuevo plano $x'y'$ [mm]

Z : Coordenada "z" del TCP del robot [mm]

Y : Coordenada "y" del TCP del robot [mm]

X: Coordenada "x" del TCP del robot [mm]

$$L_B = x' - lx$$

$$L_A = y' - ly - \text{Altura}$$

$$\text{Hipotenusa} = \sqrt{L_A^2 + L_B^2}$$

Dónde:

lx: Longitud x a lo largo del eje x' de la muñeca [mm]

ly: Longitud y a lo largo del eje y' de la muñeca [mm]

L_A: Longitud a lo largo del eje "y" de la articulación de la muñeca [mm]

L_B: Longitud a lo largo del eje "x" de la articulación de la muñeca [mm]

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{L_A}{L_B}\right)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_{\text{Brazo}}^2 - L_{\text{Antebrazo}}^2 + \text{Hipotenusa}^2}{2 \times L_{\text{Brazo}} \times \text{Hipotenusa}}\right)$$

$$\theta_2 = \alpha + \beta$$

Dónde:

α: Ángulo entre el eje "x" y la Hipotenusa [°]

β: Ángulo entre la Hipotenusa y L_{Brazo} [°]

θ₂: Ángulo de giro del L_{Brazo} del robot con respecto al eje "x" [°]

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{L_{Brazo}^2 + L_{Antebrazo}^2 - Hipotenusa^2}{2 \times L_{Brazo} \times L_{Antebrazo}} \right)$$

$$\theta_3 = -(180 - \gamma)$$

Dónde:

γ : Ángulo entre L_{Brazo} y $L_{Antebrazo}$ del robot [°]

θ_3 : Ángulo de giro del $L_{Antebrazo}$ del robot
con respecto al L_{Brazo} en sentido horario [°]

Teniendo como datos del brazo los siguientes valores,

$$Altura = 22 \text{ cm}$$

$$L_{Brazo} = 14 \text{ cm}$$

$$L_{Antebrazo} = 15,2 \text{ cm}$$

$$lx = 2,2 \text{ cm}$$

$$ly = -12 \text{ cm}$$

y conociendo la posición X, Y, Z, se reemplazará en las ecuaciones mostradas anteriormente para poder obtener los ángulos ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$).

3.1.1.3. Volumen de trabajo

Con el volumen de trabajo se determinan los límites máximos y mínimos a donde puede llegar el TCP del brazo robótico, es decir, es todo el espacio en el que el manipulador robótico puede trabajar libremente; los límites son establecidos por la estructura física del robot y los ángulos de giro de cada servomotor de las articulaciones.

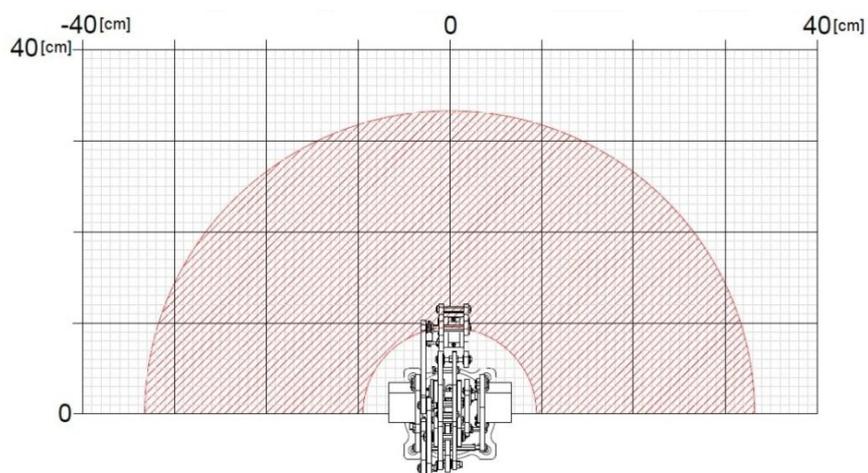


Figura 13: Representación gráfica del volumen de trabajo del brazo robótico- vista superior.

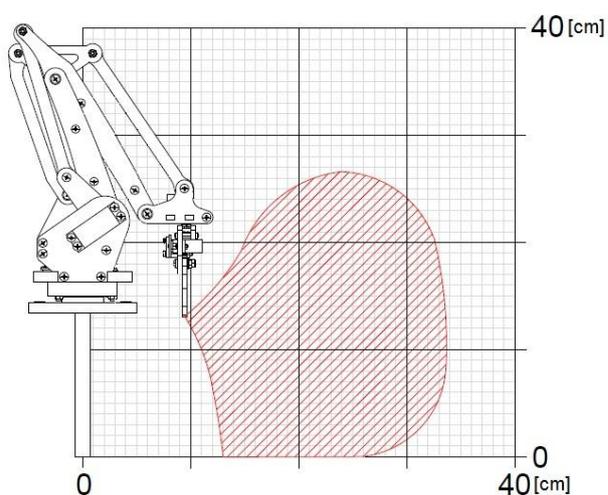


Figura 14: Representación gráfica del volumen de trabajo del brazo robótico- vista lateral.

En las *Figuras 13 y 14* se estableció una escala en *cm* y en ellas se observa el espacio de trabajo en los planos *XY* e *YZ* respectivamente del manipulador robótico.

3.1.2. Diseño del módulo de aplicación

3.1.2.1. Selección de materiales a utilizar

Para seleccionar los materiales de los diferentes elementos que componen el sistema de banda transportadora se realizan tablas de ponderaciones utilizando un rango de evaluación entre 1 y 10, donde el mínimo (1) se le asignará a las características menos idóneas con respecto a las condiciones de diseño deseadas y el máximo (10) a aquellas características que si cumplan.

Tabla 1

Selección del material de la cinta para la banda transportadora.

	BANDA	MATERIAL		
		Cinta de Nylon	Cinta de Poliéster	Lona de PVC
CARACTERÍSTICAS	Resistencia	10	8	7
	Costo	6	10	4
	Presentación de mercado	10	10	5
	Facilidad de implementación	9	9	8
	Calidad de la superficie	10	6	9
	Promedio	9	8,6	6,6

Para la banda se seleccionó cinta de Nylon (cinturón de seguridad), por cumplir con las características de resistencia y presentación.

Tabla 2

Selección del material para las estructura de todo el sistema que conforma la banda transportadora.

CARACTERÍSTICAS	ESTRUCTURA DEL SISTEMA	MATERIAL		
		Lamina de Tol	Madera	Acrílico
	Resistencia	10	7	9
	Costo	6	10	8
	Facilidad de corte	7	8	9
	Unión entre piezas	5	9	8
	Acabado final	8	7	10
	Tiempo de implementación	7	8	9
	Promedio	7,17	8,17	8,83

Se seleccionó acrílico para la toda la estructura del sistema de banda transportadora; el cual será de diferentes espesores dependiendo su aplicación.

Tabla 3

Selección del material para las piezas que serán tomadas por el brazo robótico, caja de desecho y palets.

CARACTERÍSTICAS	PIEZAS	MATERIAL		
		Lamina de Tol	Madera	Acrílico
	Peso	6	10	8
	Costo	6	10	8
	Facilidad de corte	7	8	9
	Facilidad de ensamble	5	9	8
	Complejidad de diseño	7	9	8
	Acabado final	8	7	10
	Promedio	6,50	8,83	8,50

Para las piezas que serán sujetadas por el brazo robótico, la caja de desecho y los palets se seleccionó madera, la cual por mayor disponibilidad de mercado en sus diferentes espesores y por ser una de las más ligeras se escogió madera contrachapada (triplex) de 4mm de espesor.

Tabla 4

Selección del tipo de rodamiento para la sujeción entre los rodillos y su eje.

CARACTERÍSTICAS	RODAMIENTOS	MATERIAL		
		Bola	Agujas	Rodillos
	Costo	10	8	9
	Disponibilidad en el mercado	9	7	8
	Ajuste a aplicación específica	10	7	8
	Promedio	9,67	7,33	8,33

El tipo de rodamiento a utilizar será de bola, por lo tanto utilizará rodamientos de bola 8-22 ya que son los más pequeños comercialmente dentro el país.

Tabla 5

Selección del material de los ejes de los rodillos.

CARACTERÍSTICAS	EJES	MATERIAL	
		Metálicos	Cilindro de Madera
	Disponibilidad en el mercado	10	4
	Costo	10	6
	Resistencia	9	5
	Facilidad de sujeción	10	7
	Promedio	9,75	5,5

El material seleccionado para los ejes de los rodillos será de metal (barrilla roscada) y de un diámetro de 5/16” debido al diámetro interno del rodamiento seleccionado anteriormente.

Tabla 6

Selección de los motores que formarán parte del sistema de banda transportadora.

CARACTERÍSTICAS	MOTORES	MATERIAL		
		Motor a pasos	Motor DC	Servomotor de giro continuo
	Disponibilidad en el mercado	6	10	8
	Costo	7	10	8
	Fuerza	10	5	10
	Especio necesario	8	8	9
	Facilidad de acople	8	8	9
	Conexión directa a módulo de control	7	8	10
	Promedio	7,67	8,17	9,00

Los motores seleccionados son servomotores de giro continuo, cuyas características necesarias serán calculadas posteriormente.

3.1.2.2. Diseño rodillos

Para determinar el diámetro de los rodillos se utiliza la ecuación citada a continuación, además se debe tomar en cuenta que la velocidad angular de los rodillos “no se debe exceder de las 650 r.p.m.” (Salinero, 2013, pag. 94).

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

Dónde:

n: Velocidad de los rodillos [r.p.m.]

v: Velocidad de la banda [m/s]

D: Diámetro de los rodillos [m]

Datos:

$v = 0,02 \text{ m/s}$ velocidad requerida de la banda

$n = 8 \text{ rpm}$ velocidad angular asumida de los rodillos

$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot n}$$

$$D = \frac{60 \cdot 0,02}{\pi \cdot 8}$$

$$D = 0.0477 \text{ m}$$

$$\mathbf{D = 4,77 \text{ cm} \approx 5 \text{ cm}}$$

Posteriormente se diseñan los rodillos en un software CAD/CAE tomando en cuenta las consideraciones previas de la banda.

Consideraciones:

$L = 350 \text{ mm}$ Longitud de la banda eje a eje de los rodillos externos

$B = 50 \text{ mm}$ Ancho de la banda¹⁶

$d_{eje} = 5/16''$ *diámetro del eje*

$D_{rodamiento} = 22 \text{ mm}$ *diámetro externo del rodamiento*

A continuación se muestra en la *Figura 15* se muestran las ruedas que compondrán los rodillos de la banda; cada rueda tiene un espesor de 12mm.

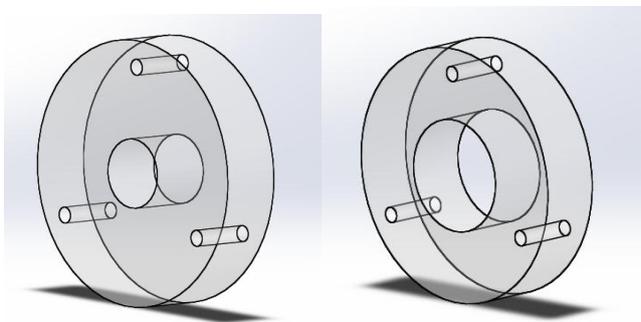


Figura 15: Rueda de eje y de rodamiento

Cada rodillo está compuesto de 4 ruedas, dos con diámetro interno de rodamiento y dos con diámetro interno de eje, ordenadas como se muestra en la *Figura 16*.

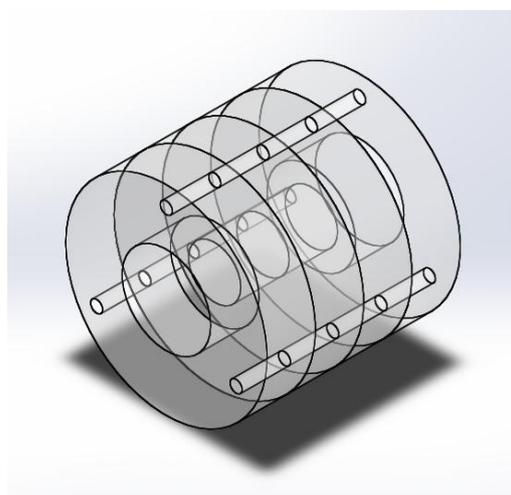


Figura 16: Rodillo para banda transportadora

3.1.2.3. Diseño banda transportadora

Al diseñar una banda transportadora se consideran varios parámetros como por ejemplo el ángulo de abrazamiento entre el tambor motriz y la banda para poder determinar las tensiones que se producen en ella y probar que la cinta no fallará. En la *Figura 17* se representan las tensiones principales de la banda y el ángulo (α) de abrazamiento entre el tambor motriz y la banda.

Para determinar correctamente las tensiones producidas en la banda, se debe considerar y analizar todas las fuerzas que ejerzan resistencia sobre ella. En la *Figura 18* se muestran las fuerzas de resistencias que se producen a lo largo de la banda.

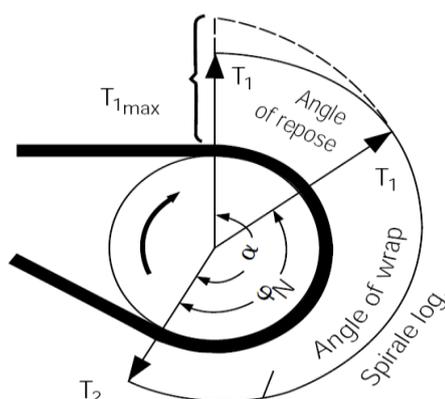


Figura 17: Tensiones y ángulos de abraza máximo en el tambor motriz.

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

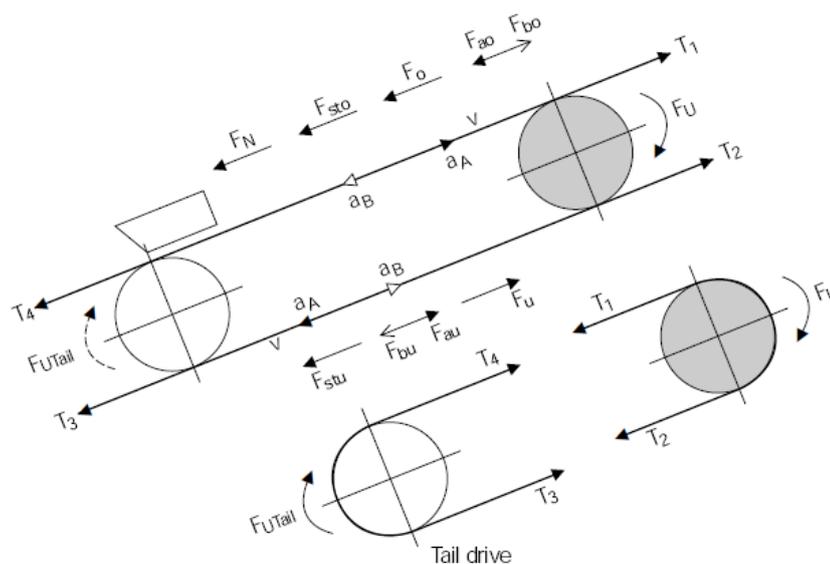


Figura 18: Distribución de fuerzas a lo largo de una banda transportadora.

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

Las ecuaciones obtenidas de la distribución de fuerzas de resistencia y tenciones de la banda son las siguientes:

$$T_1 - T_4 - F_N - F_o - F_{sto} - F_{ao} = 0 \quad \text{Carril superior}$$

$$T_3 - T_2 - F_u + F_{stu} - F_{au} = 0 \quad \text{Carril de retorno}$$

$$T_1 - F_U - T_4 = 0 \quad \text{Con accionamiento en cabeza}$$

$$T_4 + F_U - T_3 = 0 \quad \text{Con accionamiento en cola}$$

Y para obtener los valores individuales de dichas fuerzas de resistencia se resuelven las siguientes ecuaciones:

Fuerza tangencial en régimen permanente:

$$F_U = F_H + F_N + F_{st} + F_s$$

$$F_U = C \cdot f \cdot L \cdot g \cdot [m_R + (2 \cdot m_G + m_L) \cdot \cos \delta] + H \cdot g \cdot m_L + F_s$$

Dónde:

F_U : Fuerza tangencial total [N]

F_H : Resistencias principales [N]

F_N : Resistencias secundarias [N]

F_{st} : Resistencias de inclinación o descenso [N]

F_s : Resistencias especiales [N]

C : Constante de corrección de longitud [-]

$$C = 9 \quad \text{cuando} \quad L > 3m$$

f : coeficiente de fricción (ver Tabla 7) [-]

L : Longitud de la banda (distancia entre rodillos) [m]

g : Aceleración gravitacional [m/s^2]

m_R : Masa de los rodillos por unidad de longitud [Kg/m]

$$m_R = m_{R0} + m_{Ru}$$

m_L : Masa de la carga por unidad de longitud [Kg/m]

m_G : Masa de la banda por unidad de longitud [Kg/m]

δ : Angulo de inclinación de la banda [°]

H : Desnivel entre el tambor de cabeza y cola. [m]

Resistencias de fricción:

Carril superior

$$F_o = f \cdot L \cdot g \cdot [m_{R0} + m_G + m_L]$$

Carril inferior

$$F_u = f \cdot L \cdot g \cdot [m_{Ru} + m_G]$$

Dónde:

g: Aceleración gravitacional $[m/s^2]$

m_{Ru} : Masa de los rodillos del carril inferior
por unidad de longitud $[Kg/m]$

m_{Ro} : Masa de los rodillos del carril superior
por unidad de longitud $[Kg/m]$

Resistencias por inclinación:

Carril superior

$$F_{sto} = H \cdot g \cdot [m_G + m_L]$$

Carril inferior

$$F_{stu} = H \cdot g \cdot m_G$$

Resistencias inerciales:

Carril superior

$$F_{ao} = L \cdot a \cdot [m_{Redo} + m_G + m_L]$$

$$m_{Redo} = 0,9m_{Ro}$$

Carril inferior

$$F_o = L \cdot a \cdot [m_{Redu} + m_G]$$

$$m_{Redu} = 0,9m_{Ru}$$

Dónde:

a: Aceleración $[m/s^2]$

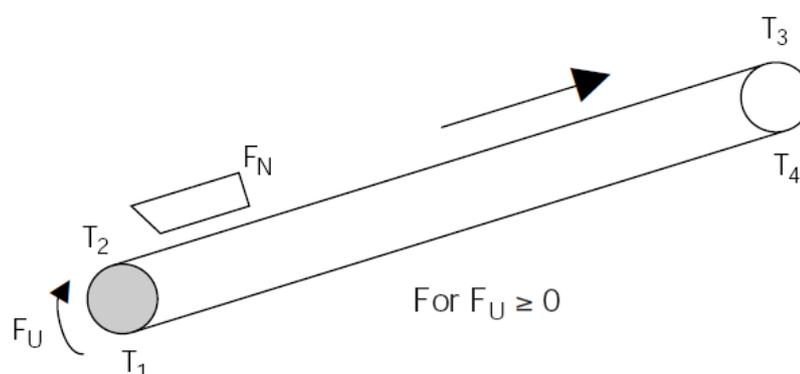
Tabla 7

Coeficiente de fricción (f) de las partes móviles.

CONDICIONES DE OPERACIÓN	Coeficiente f
Banda transportadora descendentes que requieren frenado mediante motor	0,012
Condiciones favorables con buenas bandas transportadora con rodillos de marcha suave y pequeña fricción en el material	0,017
Condiciones con ambiente normal de trabajo	0,02
Condiciones de marcha desfavorables con ambientes polvorientos y sobrecargas periódicas	0,023-0,03

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

Con las ecuaciones generales de distribución de fuerzas expuestas anteriormente se le aplica a un caso más específico de trabajo como es el de la *Figura 19*, el cual se asemeja a las condiciones establecidas previamente para el diseño; y analizándolas en condiciones estacionarias de trabajo, se obtendrán nuevas ecuaciones de distribución de fuerzas las cuales se citan a continuación.

**Figura 19:** Tensiones cuando el tambor motriz está en la cola.

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

Ecuaciones para condiciones estacionarias de trabajo

$$T_2 = F_U \cdot C_2$$

$$T_3 = T_2 + F_u + F_o + F_{sto}$$

$$T_4 = T_3$$

$$T_1 = T_4 + F_u - F_{stu}$$

Dónde:

C_2 : Coeficiente de trasmisión inferior. [-]

$$C_2 = \frac{1}{e^{\mu \cdot \alpha} - 1}$$

μ : Coeficiente de fricción entre tambor y banda
(ver Tabla 8) [-]

α : Ángulo de abrazamiento (ver Tabla 9) [rad]

Tabla 8

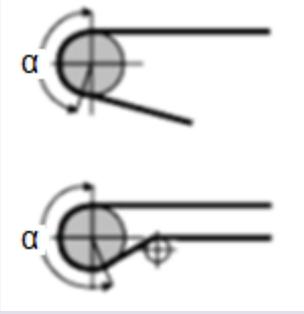
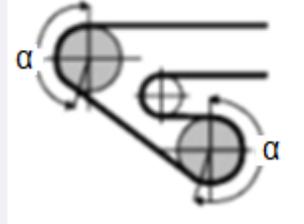
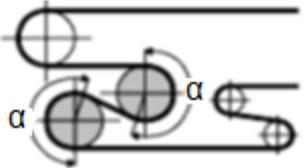
Coeficiente de fricción según la superficie de tambor “ μ ”.

SUPERFICIE DEL TAMBOR MOTRIZ	Coeficiente de fricción μ
Sin recubrimiento y mojado	0,15
Recubrimiento con goma, mojado y sucio	0,30
Sin recubrimiento y seco	0,35
Con recubrimiento de goma y seco	0,40

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

Tabla 9

Ángulos de abrace dependiendo de las diferentes configuraciones.

Angulo de abrace α [°]	
	160
	170
	180
	190
	200
	210
	220
	230
240	
	360
	370
	380
	390
	400
	410
	420
	430
	440
	450
	460
	470

Fuente: SALINERO, Mario. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE de MATLAB*. España-Madrid. Universidad Carlos III de Madrid.

- **Cálculo de tensiones de la banda**

Con las ecuaciones determinadas en condiciones estacionarias de trabajo y con las consideraciones físicas de diseño de la banda transportadora se realizan los cálculos de las tensiones.

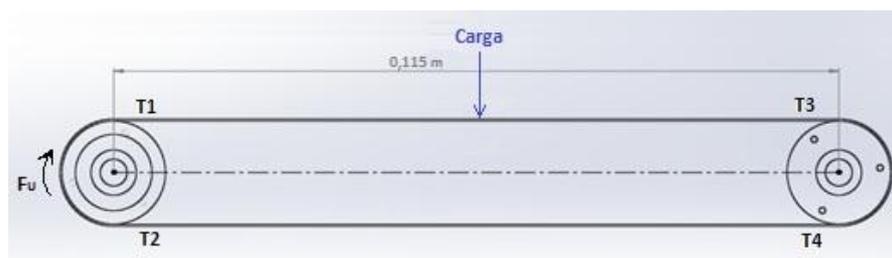


Figura 20: Diagrama de la banda transportadora.

Datos:

$m_G = 0,1 \text{ Kg/m}$	<i>Cinta transportadora (nylon poliamida)</i>
$m_L = 35 \text{ kg/m}$	<i>Carga máxima soportada por el bastidor de la banda transportadora (ver Figuras 27 y 28)</i>
$m_{Ro} = 2 \text{ Kg/m}$	<i>Rodillos carril superior (acrílico)</i>
$m_{Ru} = 0 \text{ Kg/m}$	<i>Rodillos carril inferior no existentes</i>
$L = 0,115 \text{ m}$	<i>Longitud de banda (distancia entre rodillos)</i>
$H = 0 \text{ m}$	<i>Diferencia de altura entre rodillos por lo tanto F_{stu} y F_{sto} son 0</i>
$\delta = 0^\circ$	<i>La banda no tiene inclinación</i>
$f = 0,02$	<i>Tomado de la Tabla 1</i>
$\mu = 0,40$	<i>Tomado de la Tabla 3</i>
$\alpha = 180^\circ \rightarrow \pi$	<i>Tomado de la Tabla 2</i>
$C = 9$	<i>Contante de corrección de longitud</i>
F_s	<i>En este caso se consideran despreciables las resistencias especiales.</i>

$$F_U = C \cdot f \cdot L \cdot g \cdot [m_R + (2 \cdot m_G + m_L) \cos \delta] + H \cdot g \cdot m_L + F_s$$

$$m_R = m_{Ru} + m_{Ro} = 2 \text{ Kg/m}$$

$$F_U = 9 \cdot 0,02 \cdot 0,115 \cdot 9,81 \cdot [2 + (2 \cdot 0,1 + 35)1] + 0 + 0$$

$$F_U = 7,5541 \text{ N}$$

$$F_o = f \cdot L \cdot g \cdot (m_{Ro} + m_G + m_L)$$

$$F_o = 0,02 \cdot 0,115 \cdot 9,81 \cdot (2 + 0,1 + 35)$$

$$\mathbf{F_o = 0,8371 N}$$

$$F_u = f \cdot L \cdot g \cdot (m_{Ru} + m_G)$$

$$F_u = 0,02 \cdot 0,115 \cdot 9,81 \cdot (0 + 0,1)$$

$$\mathbf{F_u = 0,002256 N}$$

$$T_2 = F_u \cdot C_2$$

$$T_2 = 7,5541 \cdot \left(\frac{1}{e^{0,4 \cdot \pi} - 1} \right)$$

$$\mathbf{T_2 = 3,005 N}$$

$$T_3 = T_2 + F_u + F_o + F_{sto}$$

$$T_3 = 3,005 + 0,002256 + 0,8371 + 0$$

$$\mathbf{T_3 = 3,8444 N}$$

$$T_4 = T_3$$

$$\mathbf{T_4 = 3,8444 N}$$

$$T_1 = T_4 + F_u - F_{stu}$$

$$T_1 = 3,8444 + 0,002256 - 0$$

$$\mathbf{T_1 = 3,8466 N}$$

Entonces,

$$\mathbf{T_{max} = T_1 = 3,8466 N}$$

A continuación se determina si la banda soporta los esfuerzos generados por la tensión máxima calculada, para ello se calculará el coeficiente de seguridad y verificará si el material no falla.

$$S = \frac{T_{max} \cdot n}{B}$$

Dónde:

S: Resistencia nominal de la banda [N/mm]

T_{max}: Tensión máxima de trabajo de la banda [N]

B: Ancho de la banda [mm]

n: Coeficiente de seguridad

Para banda con cable de acero n=8

Para el resto de bandas n=10

Datos:

S = 39,2266 MPa

Resistencia a la tracción de la banda transportadora (nylon poliamida 6)

B = 50 mm

Ancho de la banda

T_{max} = 3,8466 N

Tensión máxima de la banda

$$n = \frac{S \cdot B}{T_{max}}$$

$$n = \frac{39,2266 \cdot 50}{3,8466}$$

$$n = 509,887 > 10 \rightarrow \text{cumple}$$

El factor de seguridad obtenido indica que el material de la cinta para la banda transportadora esta sobre dimensionada para esta aplicación, esto se debe a que la carga máxima aplicada está limitada por el bastidor de la banda transportadora (ver sección 3.1.2.5.); además de que es solo un modelo demostrativo para el presente proyecto, por lo tanto su resultado no se ajusta a los de una banda con aplicaciones reales.

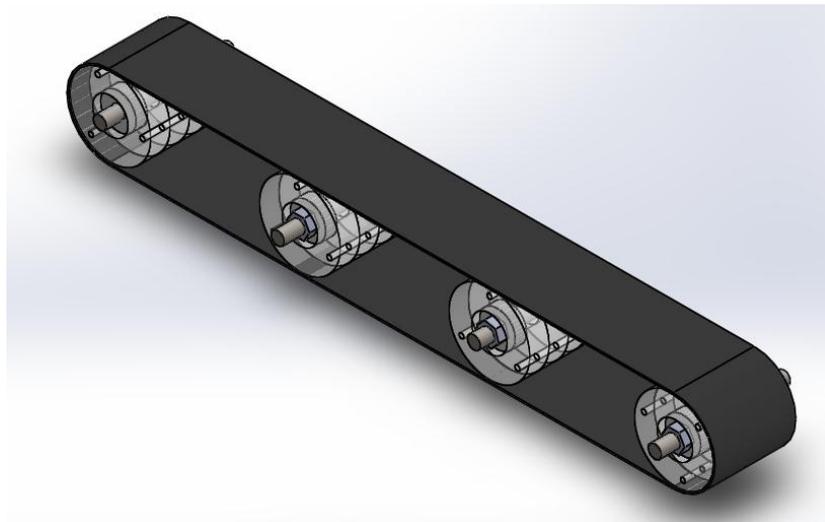


Figura 21: Ensamble de rodillos y banda.

3.1.2.4. Potencia del motor

Con la fuerza máxima soportada por la banda y la velocidad deseada se calcula la potencia mínima que debe generar el motor que proveerá el movimiento a la banda transportadora utilizando la siguiente ecuación.

$$P = F \cdot v$$

Dónde:

P: Potencia mínima requerida [Hp]

F: Fuerza máxima (tensión máxima soportada por la banda) [N]

v: Velocidad lineal o velocidad requerida por la banda transportadora) [m/s]

Datos

$T_{max} = 3,8466 \text{ N}$ Tensión máxima calculada

$v = 0,02 \text{ m/s}$ Velocidad requerida

$$P = F \cdot v$$

$$P = 3,8466 \cdot 0,02$$

$$P = 0.0769 \text{ Watts}$$

Si 1HP = 746 Watts

$$P = 0,000103 \text{ Hp}$$

Una vez obtenido la potencia mínima requerida, se calcula el torque mínimo que debe poseer el motor mediante la siguiente ecuación.

$$T = \frac{P \cdot 716}{n}$$

Dónde:

T: Torque mínimo requerido [Kg/m]

P: Potencia del motor [Hp]

n: revoluciones por minuto del motor [rpm]

Datos

$P_{min} = 0,000103 \text{ Hp}$ Potencia mínima requerida

$n = 8 \text{ rpm}$ Velocidad angular requerida

$$T = \frac{P \cdot 716}{n}$$

$$T = \frac{0,000074 \cdot 716}{8}$$

$$T_{min} = 0,00923 \text{ kg m} \rightarrow 0.923 \text{ kg cm}$$

El torque mínimo requerido es 0,92 kg-cm por lo que el servomotor seleccionado para el funcionamiento de la banda transportadora es el servo *MG995* con un torque de 10kg-cm, debido a que es el servo más comercializado y disponible en el mercado nacional, además de que su acoplamiento mecánico es lo suficientemente robusto para soportar el trabajo a realizarse.

3.1.2.5. Diseño soporte banda transportadora

Utilizando un software CAD/CAE se diseñaron las piezas que componen todo el soporte del sistema de banda transportadora, lo cual permite visualizar el resultado final del ensamble y verificar que

cada elemento del sistema este correctamente diseñado y se acoplen entre sí de una manera idónea, dichas piezas se muestran a continuación.

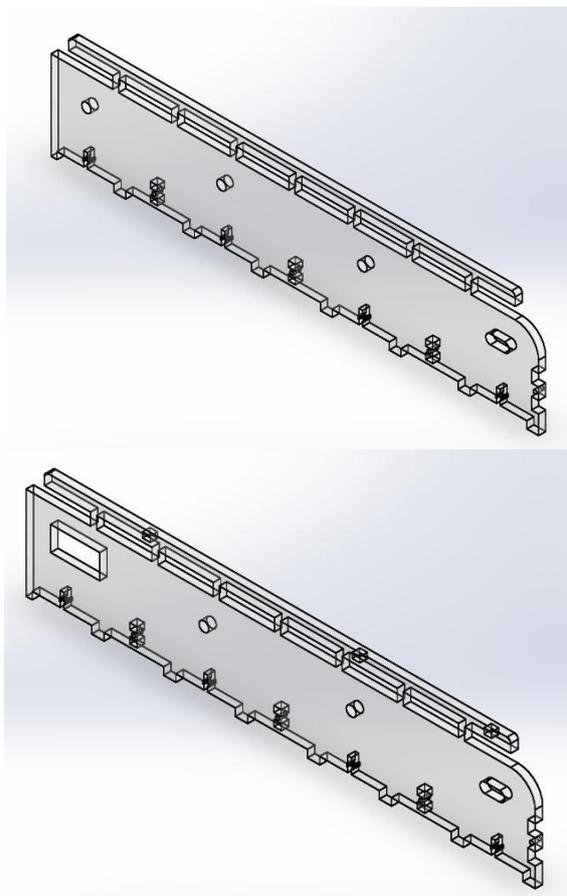


Figura 22: Soportes laterales de la banda transportadora.

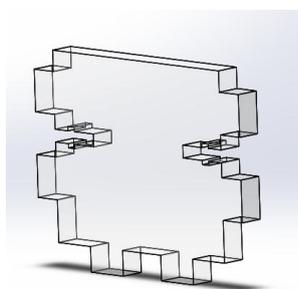


Figura 23: Soporte frontal de la banda transportadora.

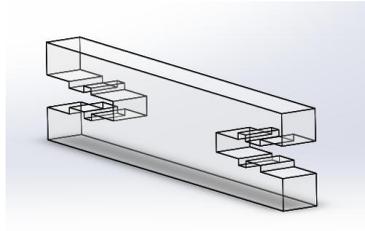


Figura 24: Sujetador de los laterales del soporte de la banda transportadora.

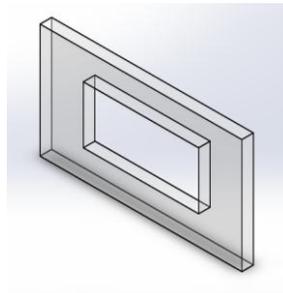


Figura 25: Base para servomotor.

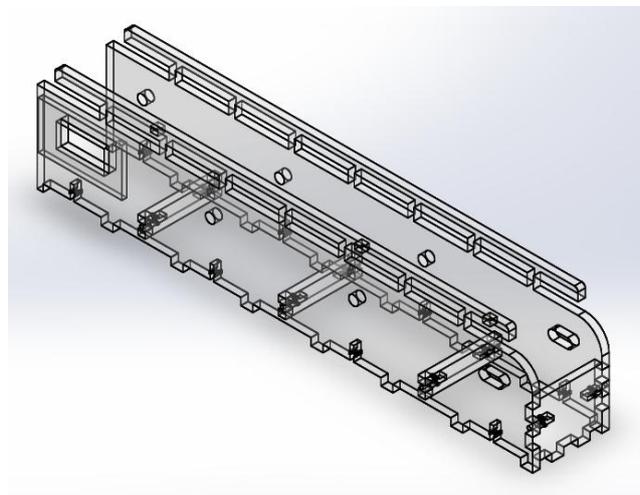


Figura 26: Ensamble soporte banda transportadora.

El diseño se lo realizó en acrílico de 6mm de espesor por facilidad de unión entre sus partes. A continuación se realiza un análisis de esfuerzo sobre la estructura, para determinar la carga máxima que soporta.

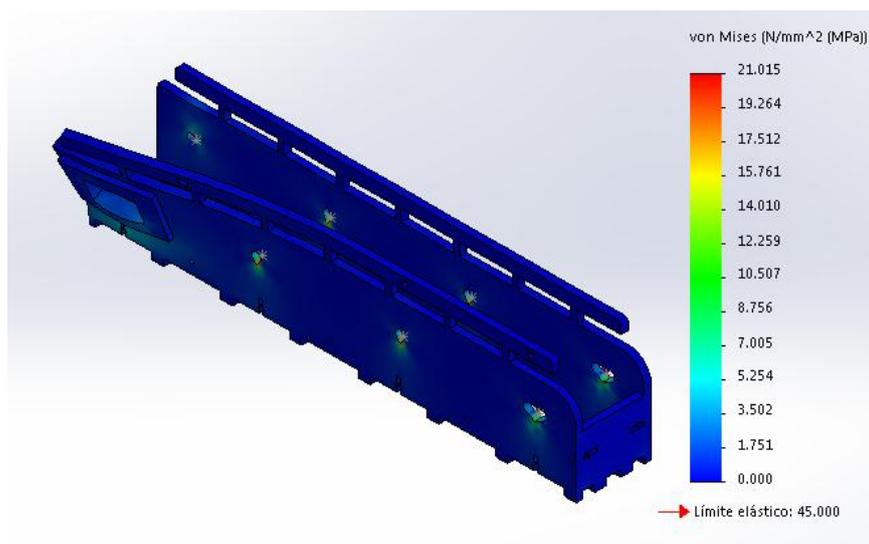


Figura 27: Análisis de esfuerzos al soporte banda transportadora.

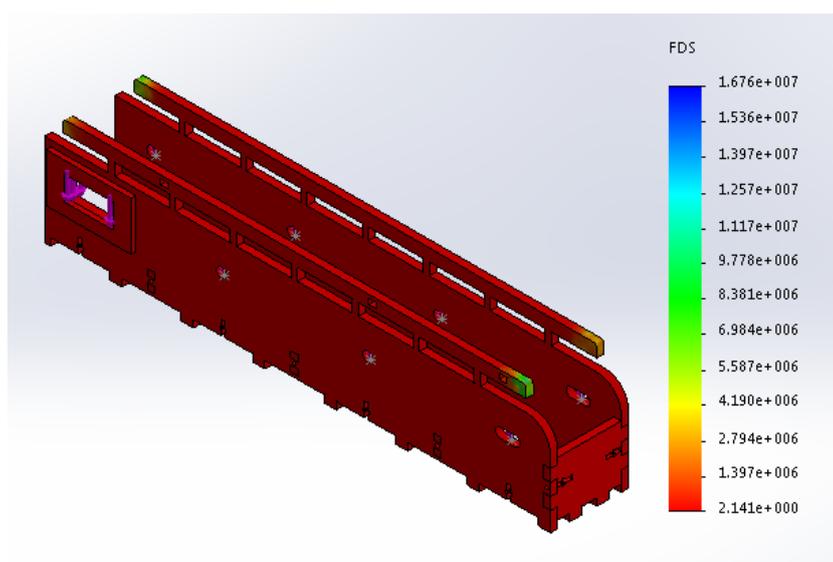


Figura 28: Factor de seguridad del soporte banda transportadora.

Para una carga máxima aplicada de 35kg se tiene un factor de seguridad de 2.14, lo cual indica que si se aplica una carga mayor a la indicada el soporte banda transportadora fallará.

3.1.2.6. Diseño geométrico de las piezas de la aplicación

- **Piezas “A”**

Estas piezas se diseñaron para que se la pueda ingresar en el dispensador de piezas “A”, su forma es prismática con un agujero en uno de sus lados donde se introducirá las piezas “B”.

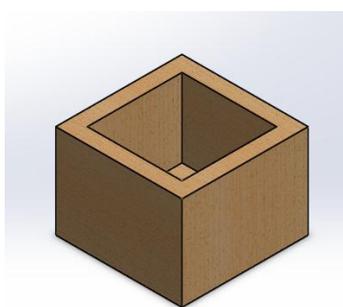


Figura 29: Pieza “A”.

- **Piezas “B”**

Las piezas “B” se diseñaron para que se la pueda ingresar en el dispensador de piezas “B”, además de poder introducir las en la cavidad de las piezas “A”.

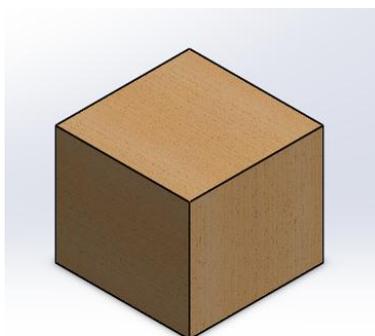


Figura 30: Pieza “B”.

3.1.2.7. Diseño dispensador piezas "A"

Para el diseño del dispensador se lo considera como una viga prismática cuadrada hueca a la cual se le realiza un análisis de deflexión para calcular el esfuerzo máximo al que podría o no fallar.

Datos:

$E = 3000 \text{ MPa}$	<i>Módulo de elasticidad del acrílico</i>
$S_y = 45 \text{ MPa}$	<i>Resistencia a la fluencia del acrílico</i>
$F = 20\text{Kgf} \rightarrow 196,2 \text{ N}$	<i>Carga máxima aplicada</i>
$L = 400 \text{ mm}$	<i>Longitud del dispensador</i>
$b = 46 \text{ mm}$	<i>Ancho del dispensador</i>
$t = 2 \text{ mm}$	<i>Espesor del material</i>
$I_{\text{agujero}} = 293,228 \text{ mm}^4$	<i>Inercia de los agujeros para el acoplamiento entre piezas</i>

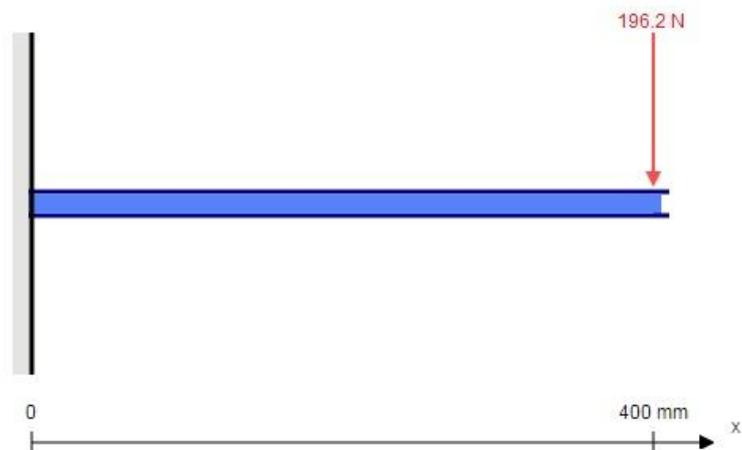


Figura 31: Diagrama de distribución de fuerzas sobre dispensador piezas A.

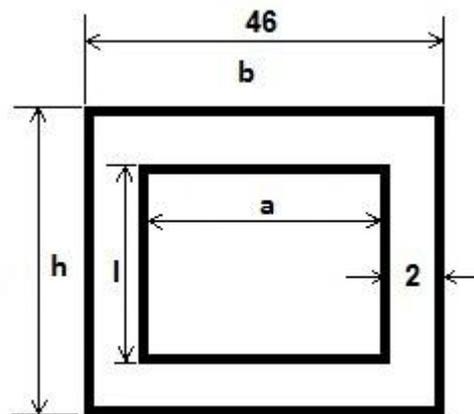


Figura 32: Sección transversal dispensador piezas A.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{a \cdot l^3}{12} - I_{\text{agujeros}}$$

$$I = \frac{46 \cdot 46^3}{12} - \frac{(46 - 4) \cdot (46 - 4)^3}{12} - 293,228$$

$$I = 113520 \text{ mm}^4$$

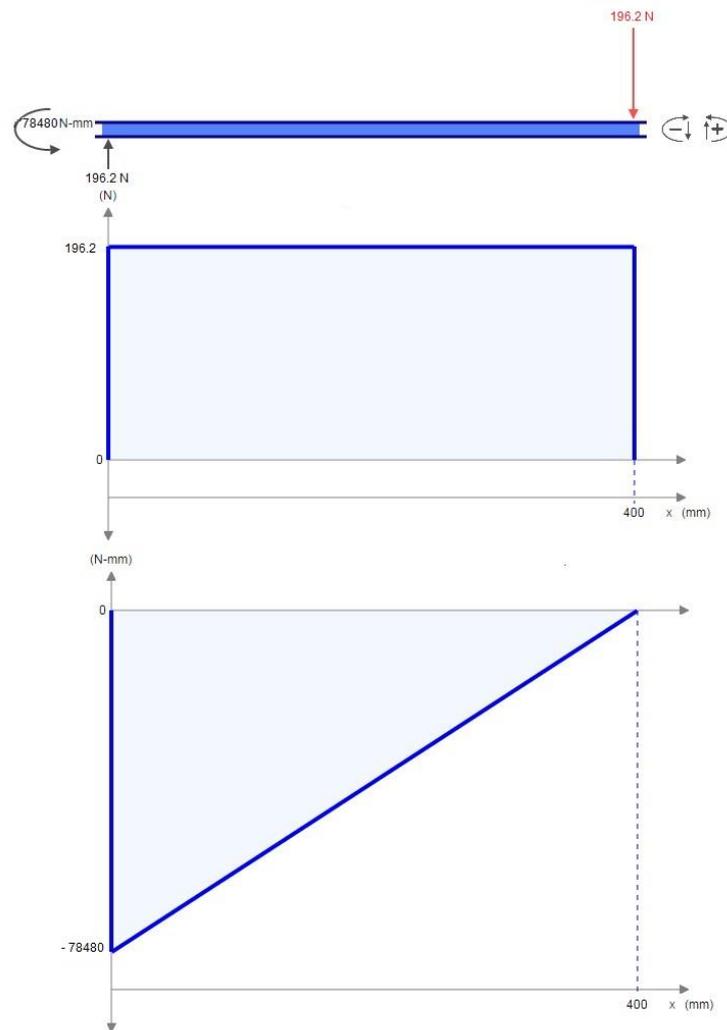


Figura 33: Diagrama de cortante y momento.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 = F$$

$$R_1 = 196,2N$$

$$V = F$$

$$V = 196,2 N$$

$$\sum M_o = 0$$

$$M_o = F \cdot L$$

$$M_o = 196,2 \cdot 400$$

$$M_o = 78480 Nmm$$

$$M = F(x - L)$$

$$M_o = -78480$$

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\sigma = \frac{78480.23}{113520}$$

$$\sigma = 15,9 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S}{\sigma}$$

$$n = \frac{45}{15,9}$$

$$n = 2,83 > 2 \rightarrow \text{cumple}$$

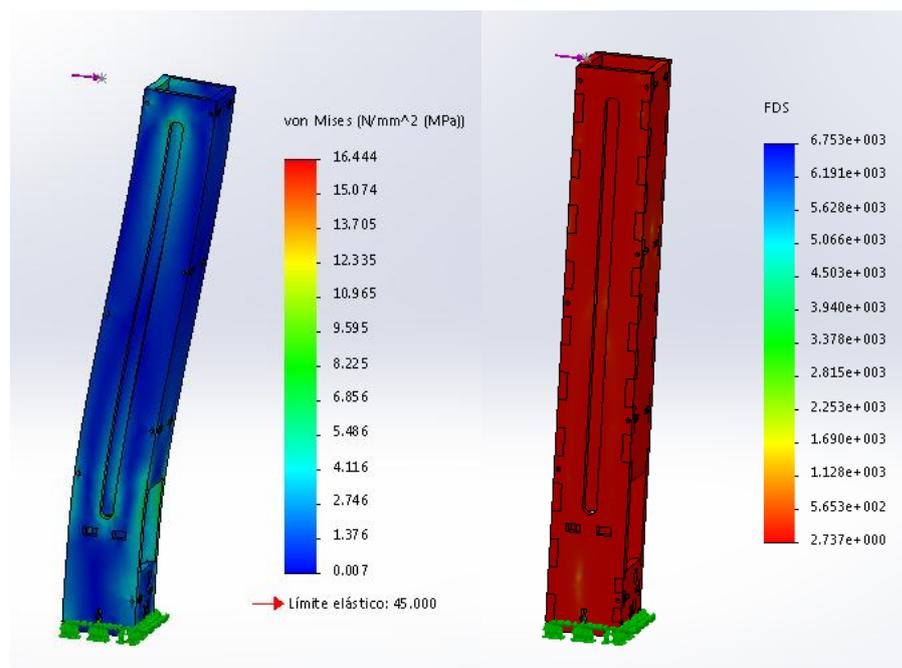


Figura 34: Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas "A" de 2mm de espesor.

El factor de seguridad calculado y el que se muestra en la *Figura 34* indican que el material seleccionado, con un espesor de 2mm, no fallará frente a una carga máxima de 20 Kgf; pero la

fabricación de las piezas se las realizará en un espesor de 6mm, debido a que brinda mayor facilidad de sujeción entre sus partes mediante pernos pequeños.

Por medio de un software CAD/CAE se diseñaron las partes que componen el dispensador para las piezas “A”, dichas partes forman una torre que contiene en su interior a la piezas “A” para luego ser empujadas hacia la banda transportadora por medio de un sistema de empuje que será expuesto posteriormente, a continuación se muestran las partes del dispensador y su ensamble.

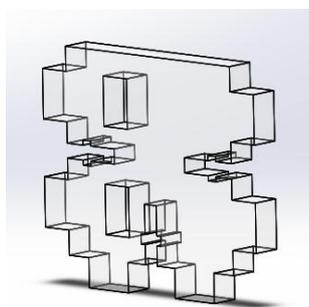


Figura 35: Frontal inferior del dispensador piezas “A”.

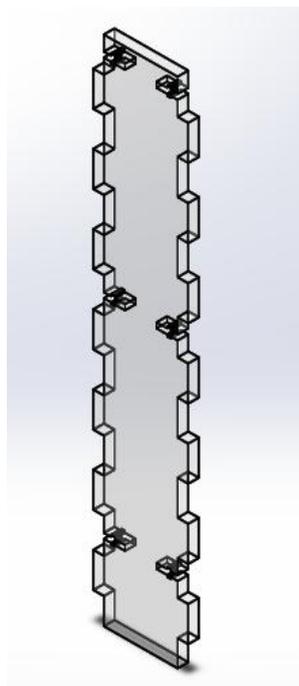


Figura 36: Frontal superior del dispensador piezas “A”.

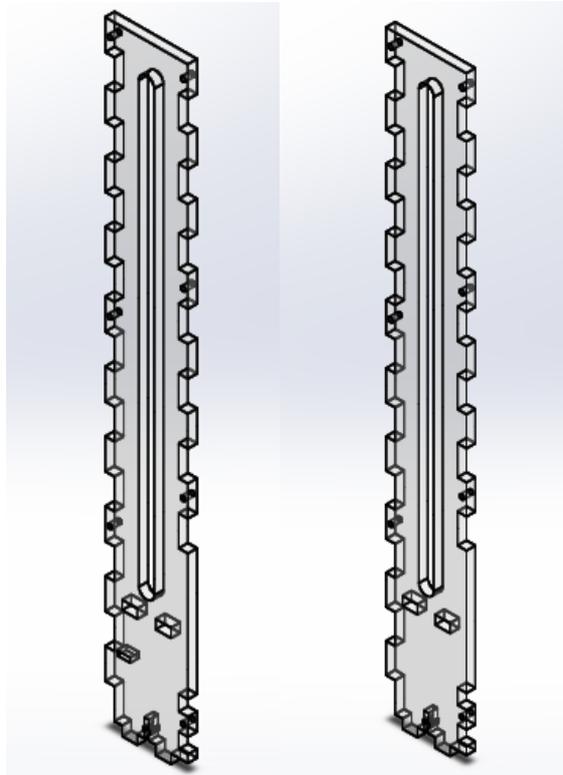


Figura 37: Laterales del dispensador piezas "A".

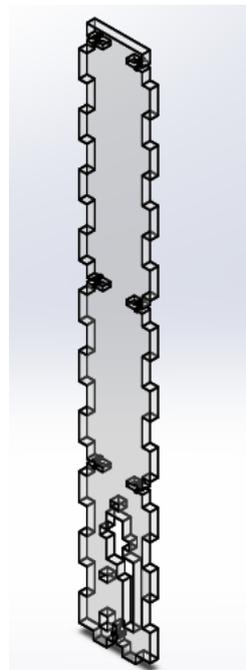


Figura 38: Posterior del dispensador piezas "A".

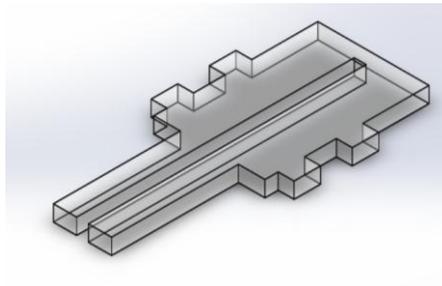


Figura 39: Base para las piezas "A".

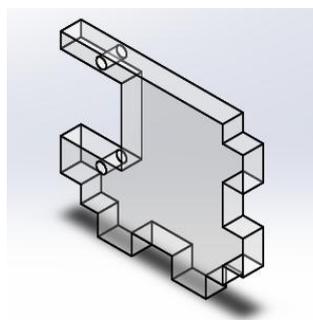


Figura 40: Soporte para servomotor.

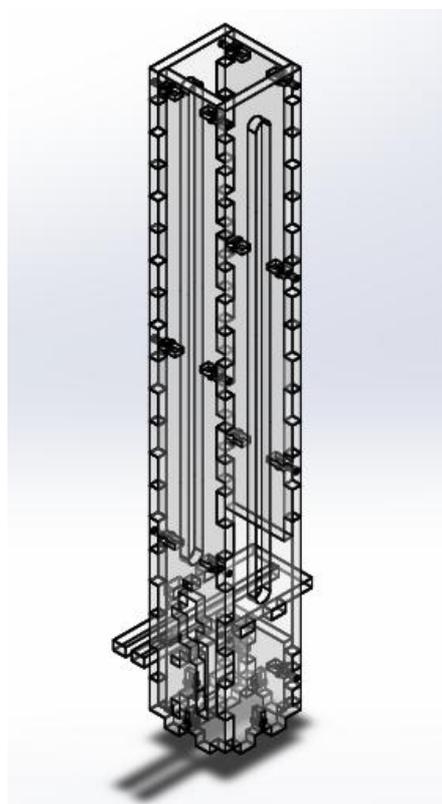


Figura 41: Ensamble dispensador pieza "A".

Una vez realizado el ensamblaje en el software CAD/CAE, este es sometido a un análisis de esfuerzos aplicando una carga de 20kgf, con ello se comprueba que la estructura con material de mayor espesor (6mm, especificado anteriormente) al utilizado en los cálculos de diseño tampoco fallará.

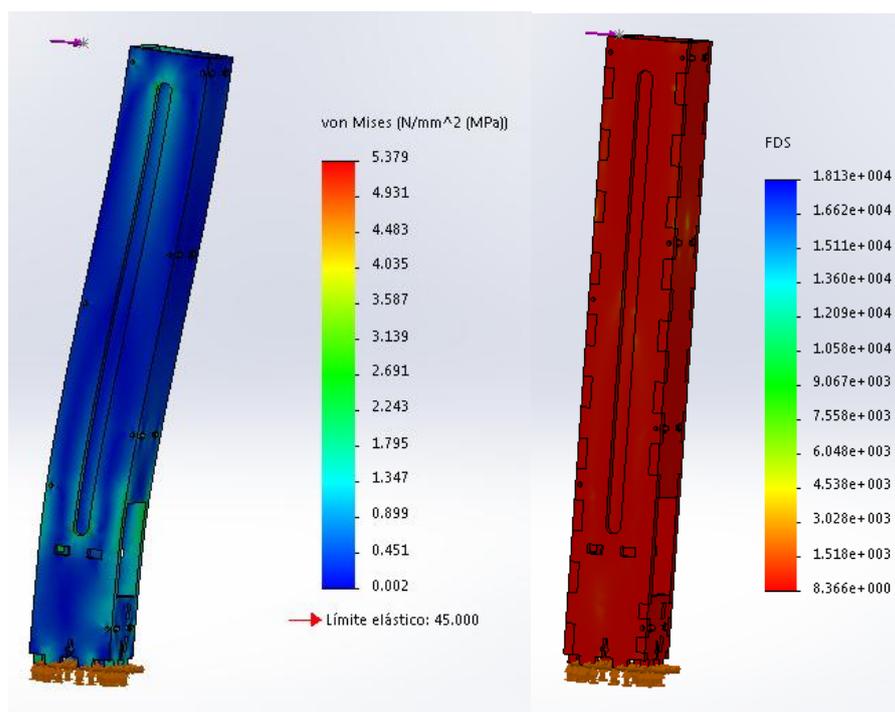


Figura 42: Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “A” de 6mm de espesor.

Como se observa en la *Figura 42*, la estructura no falla y su factor de seguridad indica que la estructura está sobre dimensionada.

- **Diseño Sistema de empuje**

Para diseñar el sistema de empuje para el dispensador de piezas “A” se basó en el mecanismo de retorno rápido, el cual tiene

un recorrido lento de avance, que en este caso empujará a la pieza “A” permitiendo que ésta se monte sobre la banda suavemente, y un recorrido rápido al regreso. A continuación se muestran las partes diseñadas que conforman dicho sistema.

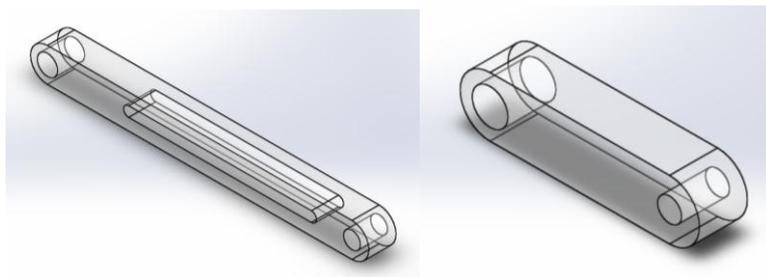


Figura 43: Eslabones para el sistema de empuje.

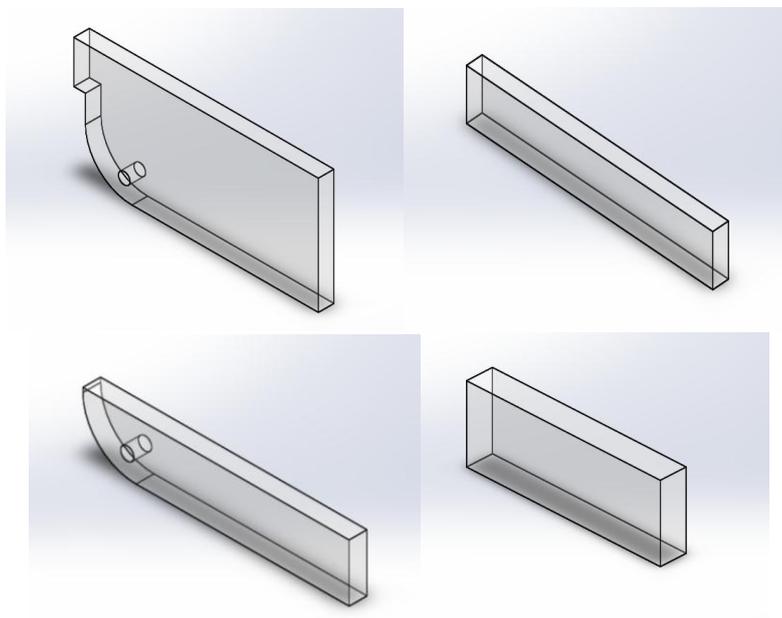


Figura 44: Partes de la Corredera para el sistema de empuje.

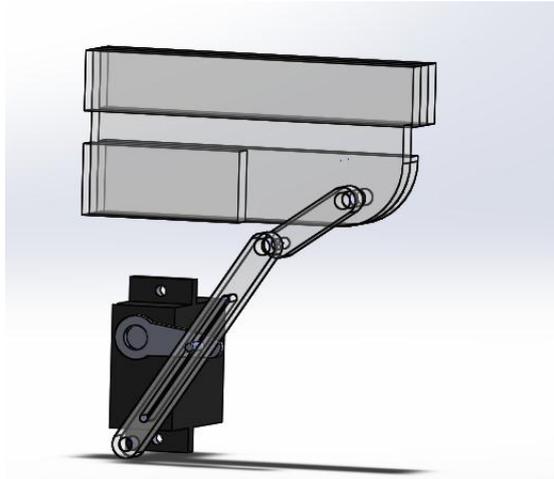


Figura 45: Ensamble sistema de empuje.

Posteriormente al diseño de las partes que componen el sistema de empuje se realizó en un software CAD/CAE un análisis de fatiga en el eslabón más crítico, considerando que tiene 4mm de espesor y está sometido a una carga máxima de 1Kgf ; cabe mencionar que para obtener resultados de fatiga se debe primero realizar un estudio estático.

En las figuras a continuación se podrá observar de dicho eslabón, el esfuerzo máximo, el porcentaje de daño y su ciclo de vida.

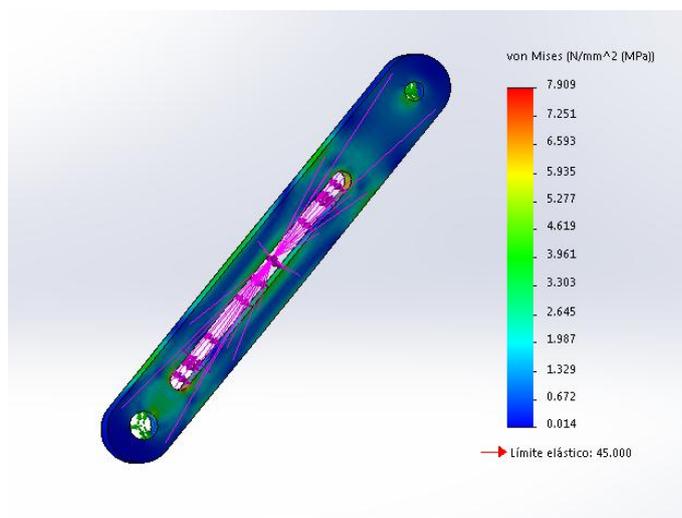


Figura 46: Análisis de esfuerzos en eslabón crítico del sistema de empuje.

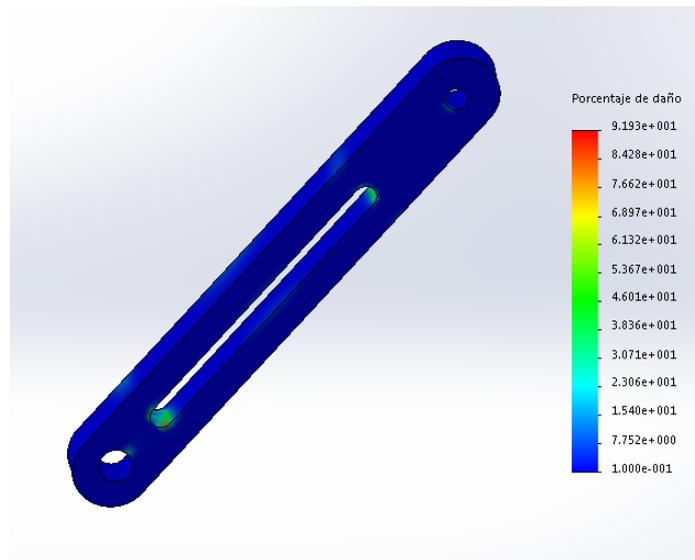


Figura 47: Análisis de fatiga- porcentaje de daño del eslabón crítico del sistema de empuje.

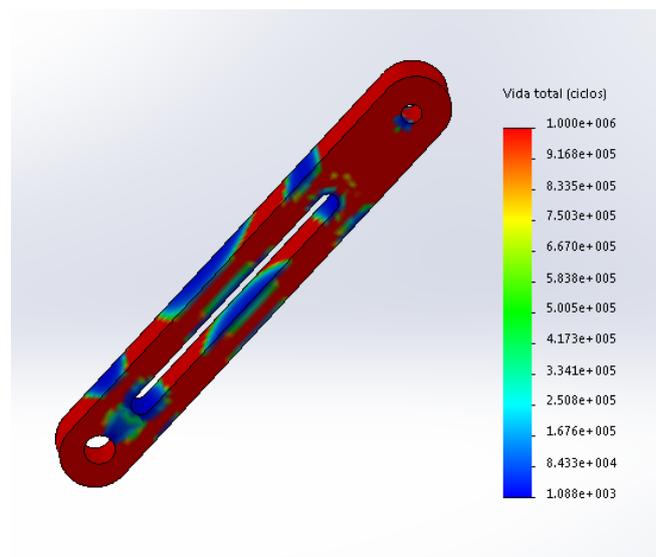


Figura 48: Análisis de fatiga- ciclos de vida del eslabón crítico del sistema de empuje.

3.1.2.8. Diseño dispensador piezas “B”

Se le considera al dispensador como una viga prismática cuadrada hueca a la cual se le realiza un análisis de deflexión para calcular el esfuerzo máximo al que podría o no fallar.

Datos:

$$E = 3000 \text{ MPa}$$

Módulo de elasticidad del acrílico

$$S = 45 \text{ MPa}$$

Resistencia a la fluencia del acrílico

$$F = 20 \text{ Kg}f \rightarrow 196,2 \text{ N}$$

Carga máxima aplicada

$$L = 147 \text{ mm}$$

Longitud del dispensador

$$b = 33 \text{ mm}$$

Ancho del dispensador

$$t = 2 \text{ mm}$$

Espesor del material

$$I_{\text{agujero}} = 470,901 \text{ mm}^4$$

Inercia de los agujeros para el acoplamiento entre piezas

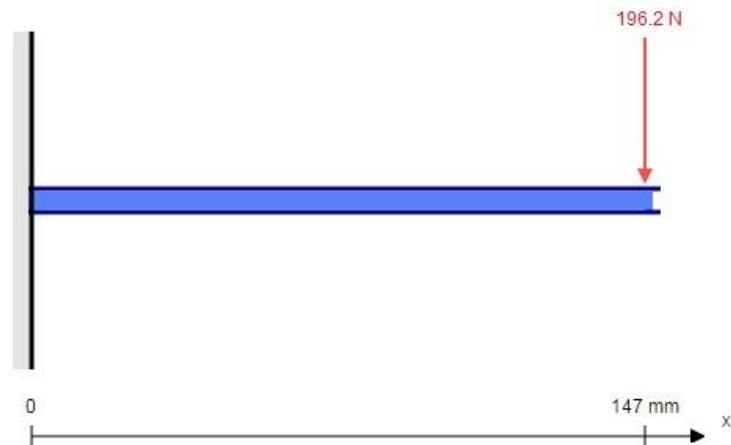


Figura 49: Diagrama de distribución de fuerzas sobre dispensador piezas B.

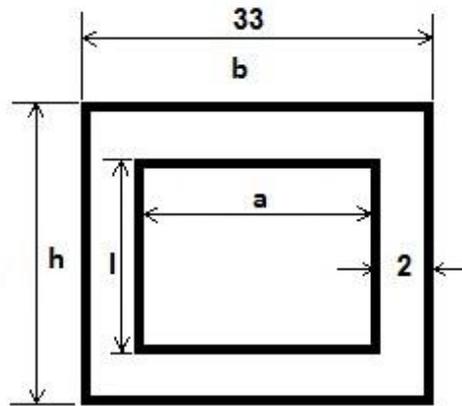


Figura 50: Sección transversal dispensador piezas B.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{a \cdot l^3}{12} - I_{\text{agujeros}}$$

$$I = \frac{33 \cdot 33^3}{12} - \frac{(33 - 4) \cdot (33 - 4)^3}{12} - 470,901$$

$$I = 39415,8 \text{ mm}^4$$

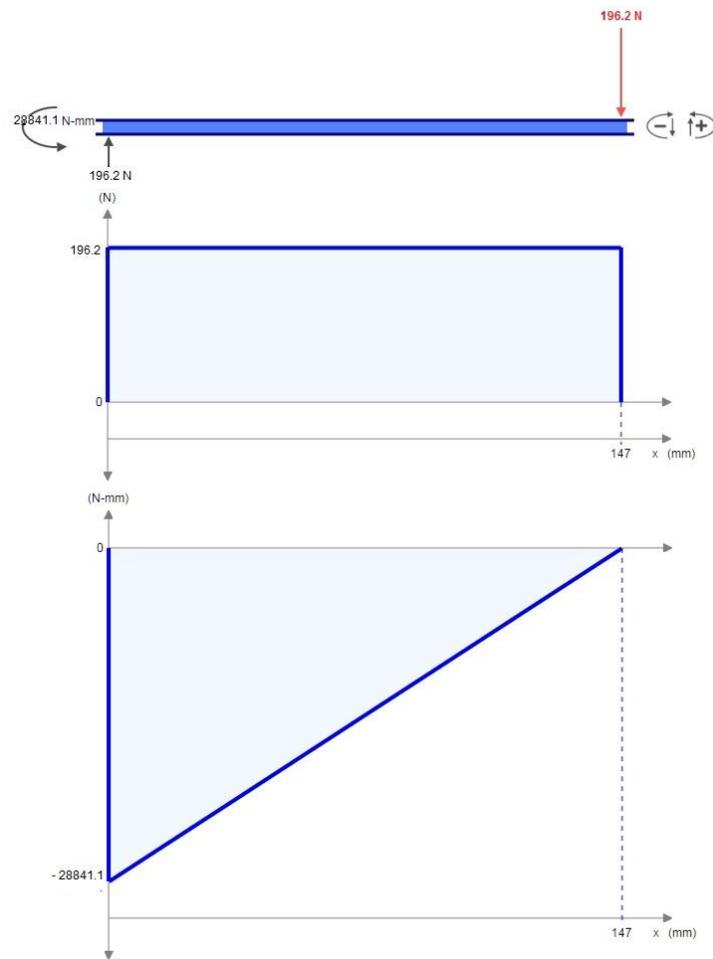


Figura 51: Diagrama de cortante y momento.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 = F$$

$$R_1 = 196,2 \text{ N}$$

$$V = F$$

$$V = 196,2 \text{ N}$$

$$\sum M_o = 0$$

$$M_o = F \cdot L$$

$$M_o = 196,2 \cdot 147$$

$$M_o = 28841,4 \text{ Nmm}$$

$$M = F(x - L)$$

$$M_o = -28841,4$$

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\sigma = \frac{28841,4 \cdot 16,5}{39415,8}$$

$$\sigma = 12,0734 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S}{\sigma}$$

$$n = \frac{45}{12,0734}$$

$$n = 3,73 > 2 \rightarrow \text{cumple}$$

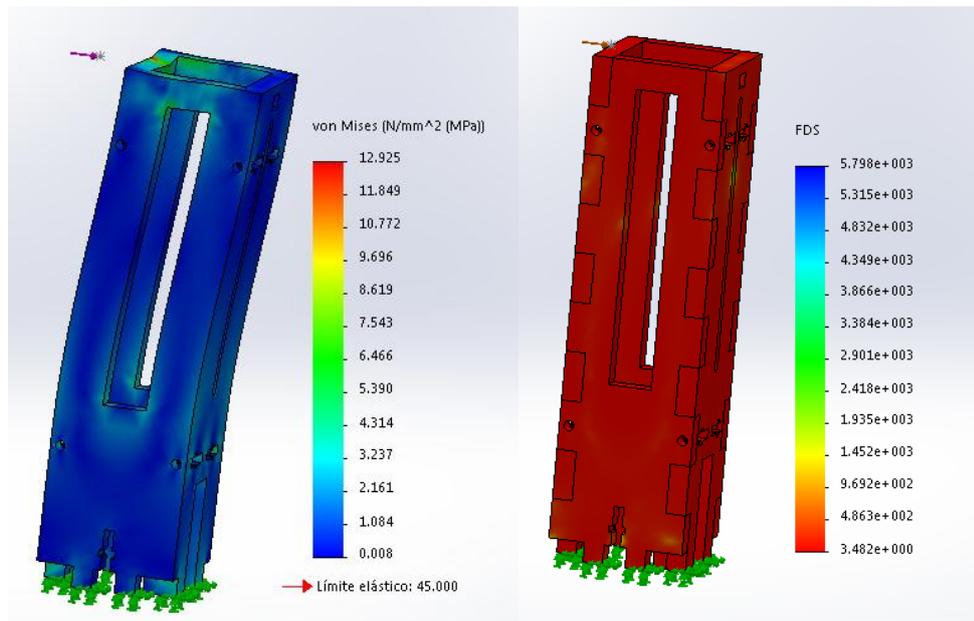


Figura 52: Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “B” de 2mm de espesor.

El factor de seguridad calculado y el que se muestra en la *Figura 52* indican que el material seleccionado, con un espesor de 2mm, no fallará frente a una carga máxima de 20 Kgf; pero la fabricación de las piezas se las realizará en un espesor de 6mm,

debido a que brinda mayor facilidad de sujeción entre sus partes mediante pernos pequeños.

Mediante un software CAD/CAE se diseñaron las partes que componen el dispensador para las piezas “B”, dichas partes forman una torre que contiene en su interior a la piezas “B” para luego ser elevadas mediante un mecanismo de elevación que será expuesto posteriormente, a continuación se muestran las partes del dispensador y su ensamble.

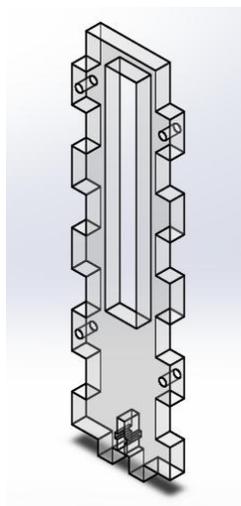


Figura 53: Laterales del dispensador piezas “B”.

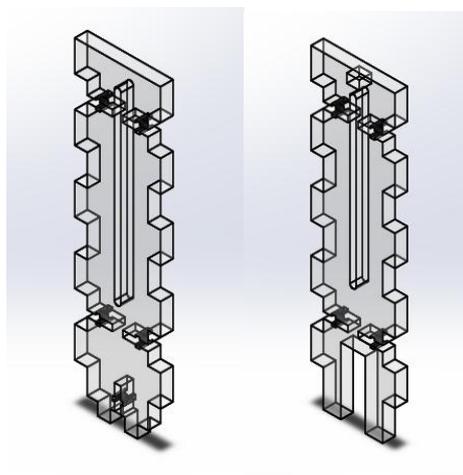


Figura 54: Frontal y Posterior del dispensador piezas “B”.

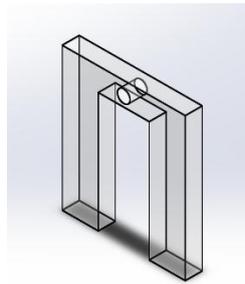


Figura 55: Soporte para servomotor.

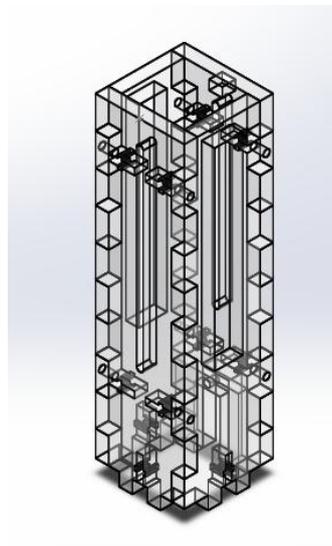


Figura 56: Ensamble dispensador piezas "B".

Una vez realizado el ensamble en el software CAD/CAE, este es sometido a un análisis de esfuerzos aplicando una carga de 20kgf, con ello se comprueba que la estructura con material de mayor espesor (6mm, especificado anteriormente) al utilizado en los cálculos de diseño tampoco fallará.

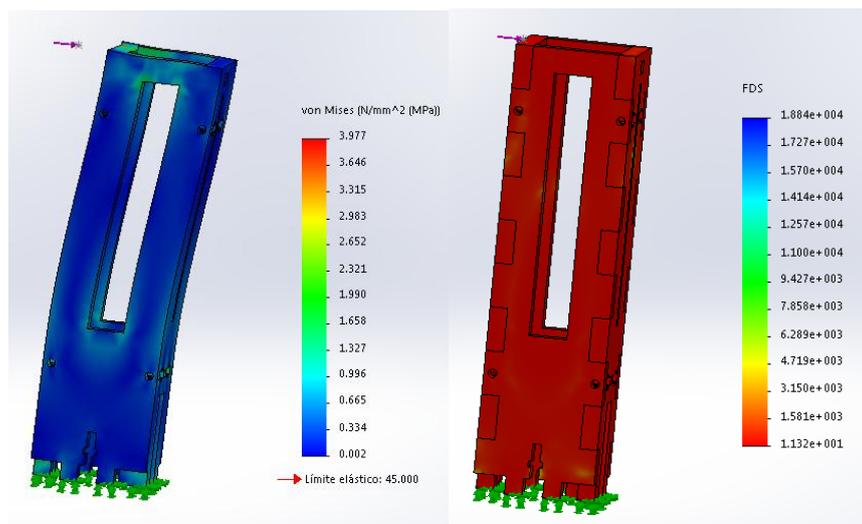


Figura 57: Análisis de esfuerzos por software del dispensador de piezas “B” de 6mm de espesor.

Como se observa en la *Figura 57*, la estructura no falla y su factor de seguridad indica que la estructura está sobre dimensionada.

- **Diseño del sistema de elevación**

Para diseñar el sistema de elevación para el dispensador de piezas “B” se basó en un sistema de poleas, el cual, cuando su polea motriz gira en sentido horario, éste enrolla la cuerda (en este caso hilo nylon) permitiendo la elevación de las piezas “B”, y cuando la polea motriz gira en sentido antihorario desenrolla la cuerda para que la base de las piezas “B” descienda y se pueda colocar nuevamente piezas en el dispensador. A continuación se muestran las partes diseñadas que conforman dicho sistema.

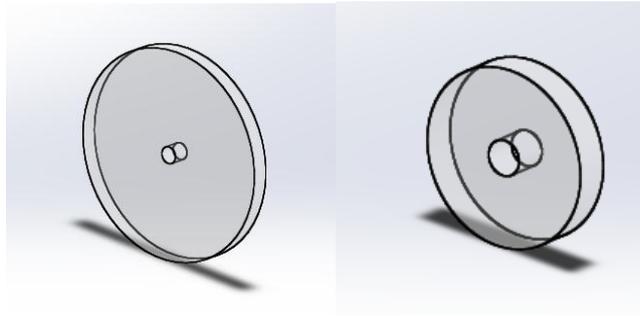


Figura 58: Ruedas que conforman la polea motriz.

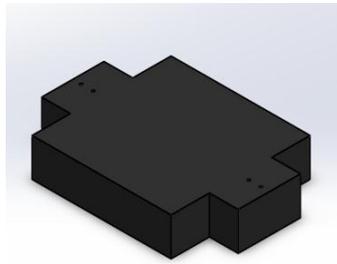


Figura 59: Base para las piezas B.

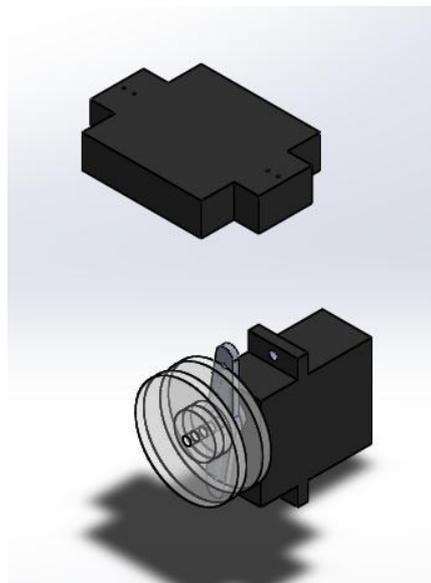


Figura 60: Ensamble sistema de elevación.

Posteriormente al diseño de las partes que componen el elevador, se realiza un análisis de tensiones para determinar el

torque mínimo que debe generar el motor que provee el giro a la polea motriz, no se realiza un análisis de tensión máxima en la cuerda debido a que ese dato está dada en las especificaciones del fabricante de la cuerda.

Datos:

$$m=0,03 \text{ Kg}$$

Carga máxima a utilizar en el sistema.

$$M_{\text{Hilo}}=4,2 \text{ kg}$$

Carga máxima soportada por el hilo nylon (dato de fábrica).

$$D_{\text{Hilo}}= 0,25 \text{ mm}$$

dato de fábrica

$$r_{\text{Polea Motriz}}= 0,5 \text{ cm}$$

Radio de la polea motriz.

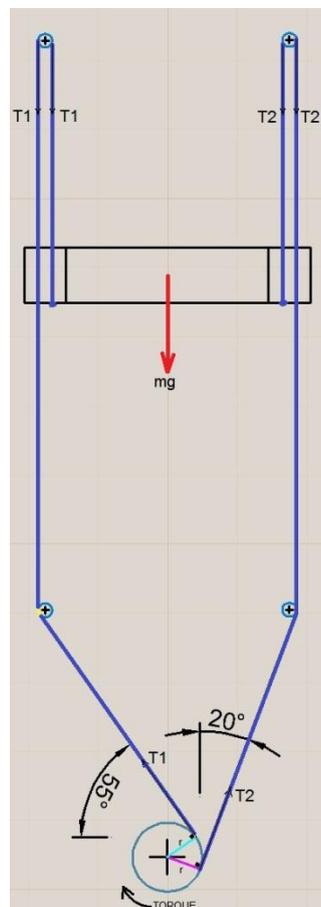


Figura 61: Distribución de tenciones sobre el sistema de elevación.

Realizando el diagrama de cuerpo libre del sistema determinamos el valor de las tensiones en condiciones estacionarias.

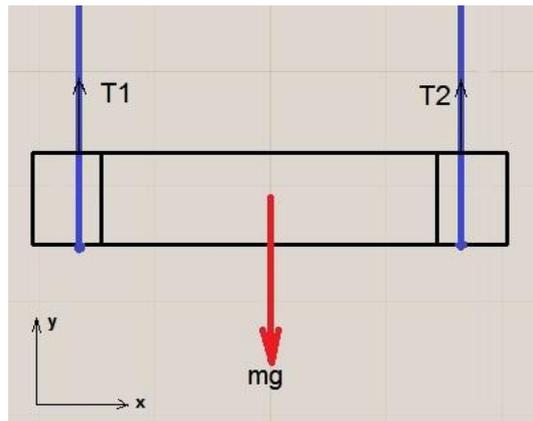


Figura 62: Diagrama de cuerpo libre en condiciones estacionarias.

Realizando sumatoria de fuerzas en el eje “y” tenemos:

$$\sum F_y = 0$$

$$T_1 + T_2 = mg$$

Dónde:

T_1: Tensión 1 de la cuerda	[N]
T_2: Tensión 2 de la cuerda	[N]
m: Carga del sistema (masa)	[Kg]
g: Gravedad	[m/s]

$$T_1 = T_2$$

$$2 \cdot T_1 = 0,03 \cdot 9,81$$

$$T_1 = 0,1472 \text{ N}$$

por tanto,

$$T_2 = 0,1472 \text{ N}$$

Para determinar el torque mínimo necesario se utiliza la siguiente ecuación.

$$\tau = F \cdot r$$

Dónde:

τ : Torque mínimo del motor que genera movimiento en la polea motriz. [Kg-cm]

F : Fuerza ejercida sobre cuerpo. [N]

r : Distancia perpendicular entre el punto de giro y la fuerza ejercida. [cm]

$$\tau = (T_1 + T_2) \cdot r$$

(ver Figura 61)

$$\tau = 2 \cdot 0,1472 \cdot 0,5$$

$$\tau = 0,1472 \text{ N} - \text{cm} \rightarrow 1,44 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Por tanto se seleccionó un micro-servo con un torque de 1,8 kg-cm para este sistema de elevación.

$$n = \frac{\tau_{max}}{\tau_{requerido}}$$

$$n = \frac{1,8}{1,44}$$

$$n = 1,25 > 1 \rightarrow \text{cumple}$$

Trabajando al servomotor con un torque del 1,44 kg-cm obtenemos un factor de seguridad de 1,25.

3.1.2.9. Diseño geométrico de la base del módulo de aplicación

Esta base se diseñó para que, sobre ella se puedan montar todas las partes que componen el módulo de aplicación, como son los dispensadores, el soporte de la banda transportadora y la caja de la tarjeta de I/O de la aplicación, permitiendo una mayor sujeción y estabilidad para que cumplan correctamente su función.

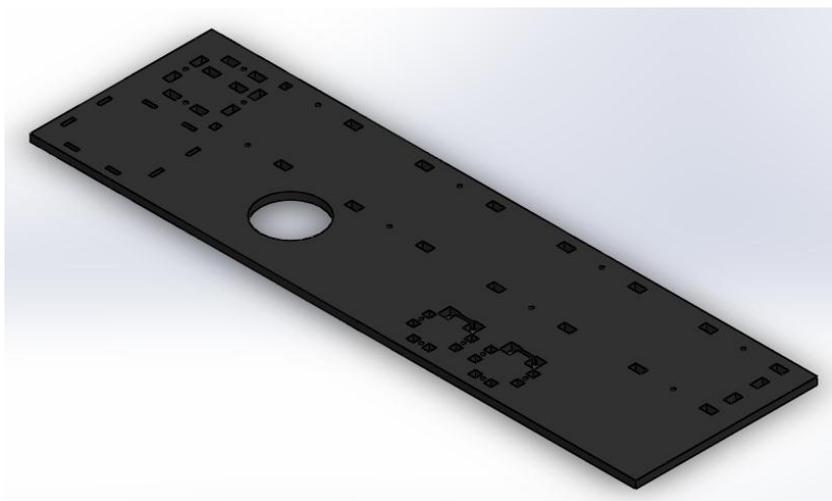


Figura 63: Base para las piezas del módulo de aplicación.

3.1.2.10. Diseño geométrico del contenedor de desecho

Este contenedor se diseñó para que dentro de éste el brazo robótico coloque las piezas que por medio de visión artificial se detectó como erróneas o defectuosas.

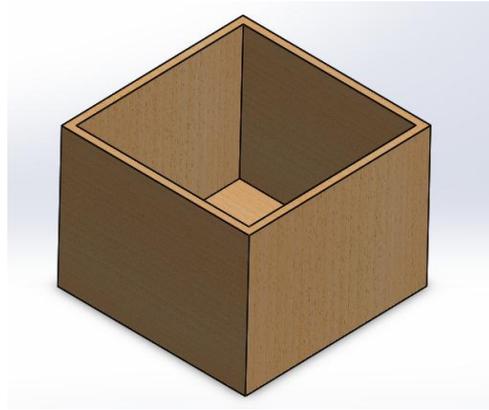


Figura 64: Contenedor de desecho.

3.1.2.11. Diseño geométrico de los palets

Los palets se diseñaron para que el brazo robótico coloque sobre cada uno de ellos los respectivos ensambles, entre las piezas “A” y las piezas “B”, de acuerdo a su color.

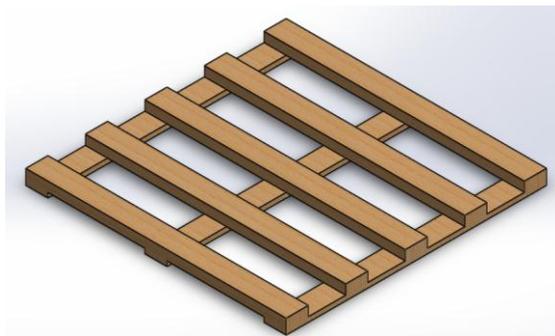


Figura 65: Diseño de Palet.

3.1.2.12. Diseño geométrico de las cajas para circuitos

- **Caja para la tarjeta I/O de la aplicación**

Para la tarjeta de entradas y salidas de la aplicación se diseñó una caja que permitirá proteger al circuito y a la vez permitirá la fácil y ordenada conexión de todos los cables pertenecientes a los actuadores y sensores de la aplicación.

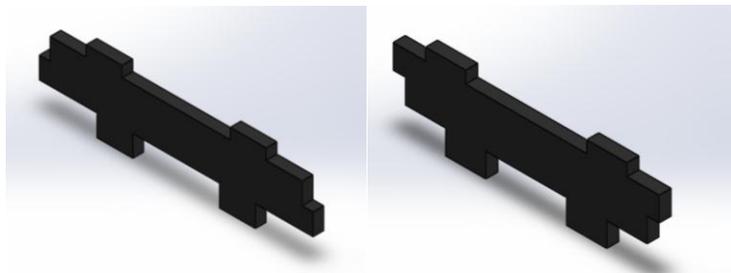


Figura 66: Laterales para la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.

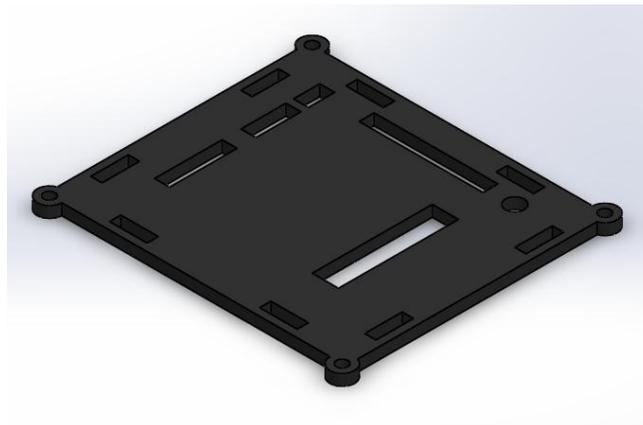


Figura 67: Tapa para la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.

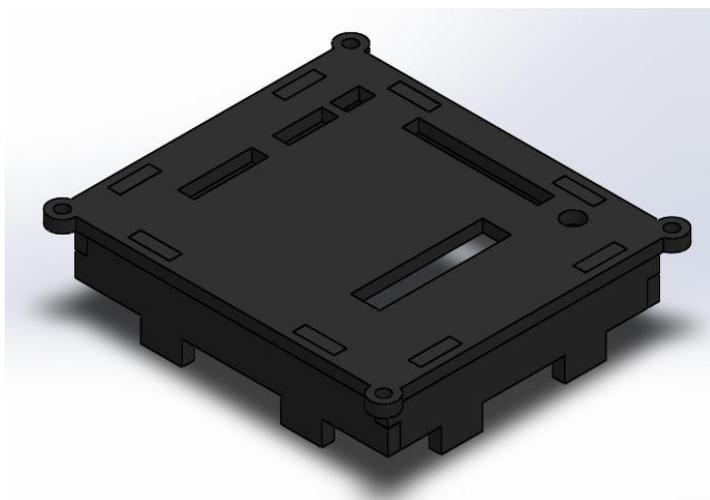


Figura 68: Ensamble de la caja de la tarjeta I/O de la aplicación.

- **Caja para el control manual**

Se diseñó una caja contenedora para el circuito del control manual lo que permite la protección de dicho circuito y su fácil manipulación por parte del usuario; esta caja se montará sobre la estructura de la mesa de trabajo.

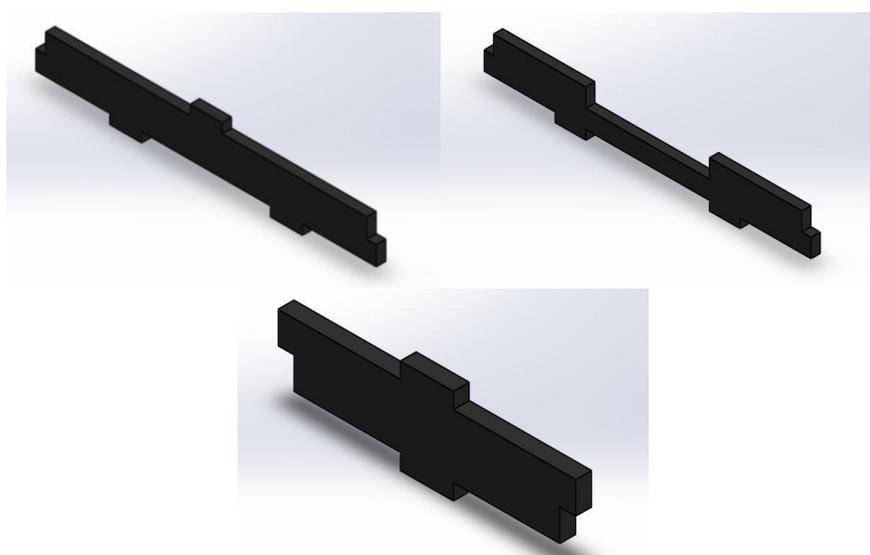


Figura 69: Laterales para la caja del control manual.

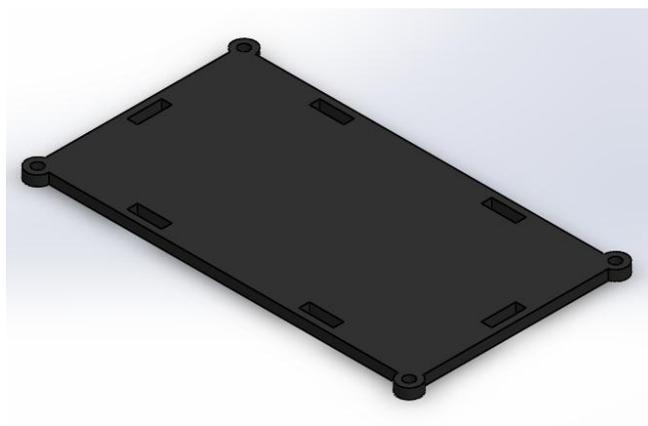


Figura 70: Base para la caja del control manual.

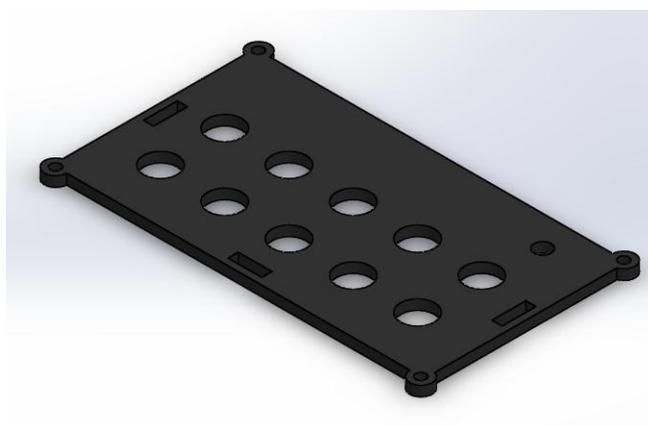


Figura 71: Tapa para la caja del control manual.

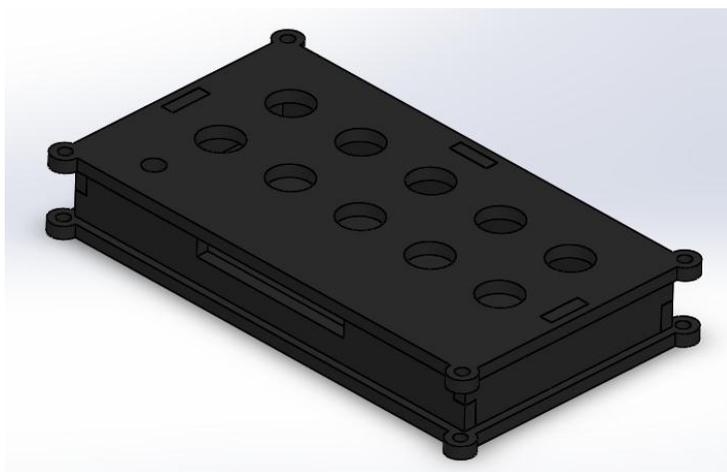


Figura 72: Ensamble de la caja del control manual.

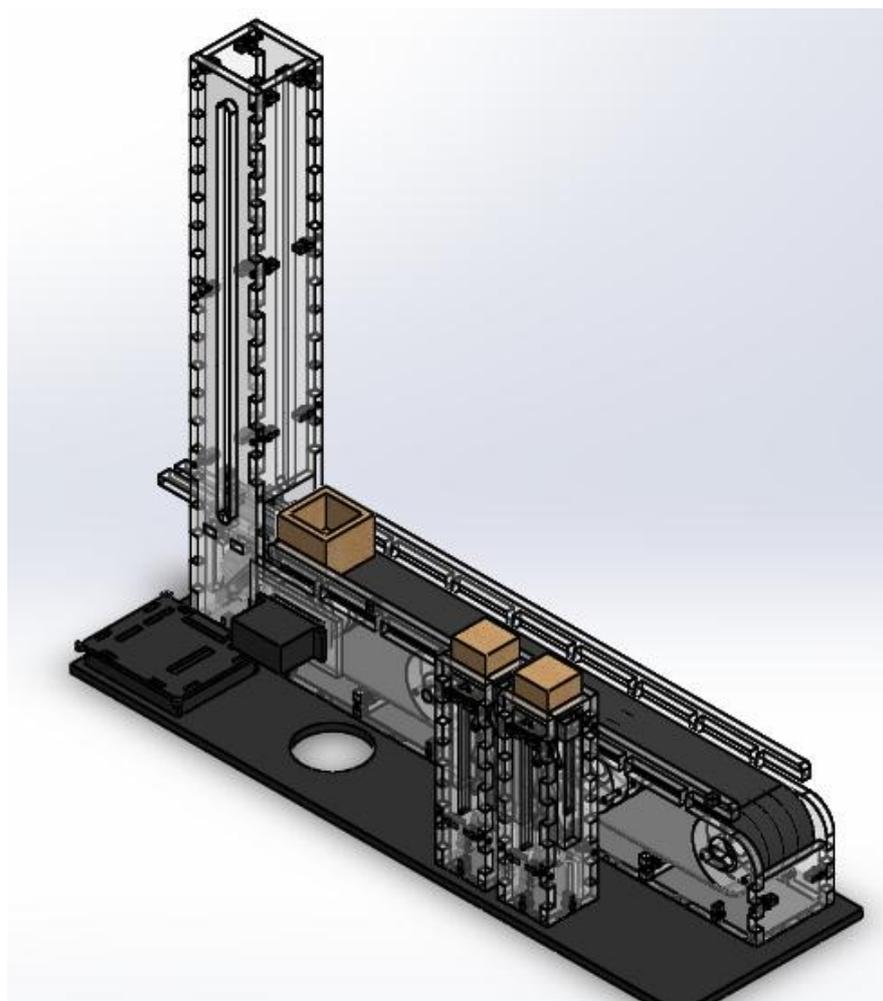


Figura 73: Ensamble final del módulo de aplicación.

3.2. Diseño electrónico

3.2.1. Diagrama de bloques

El hardware diseñado para el presente proyecto está compuesto por varias secciones las cuales son: Interfaz de Control del Brazo Robótico, Control Manual, Tarjeta de I/O de la Aplicación y la respectiva Tarjeta de Alimentación, la interconexión entre estas secciones y con los otros elementos del sistema están detallados en el siguiente diagrama de bloques.

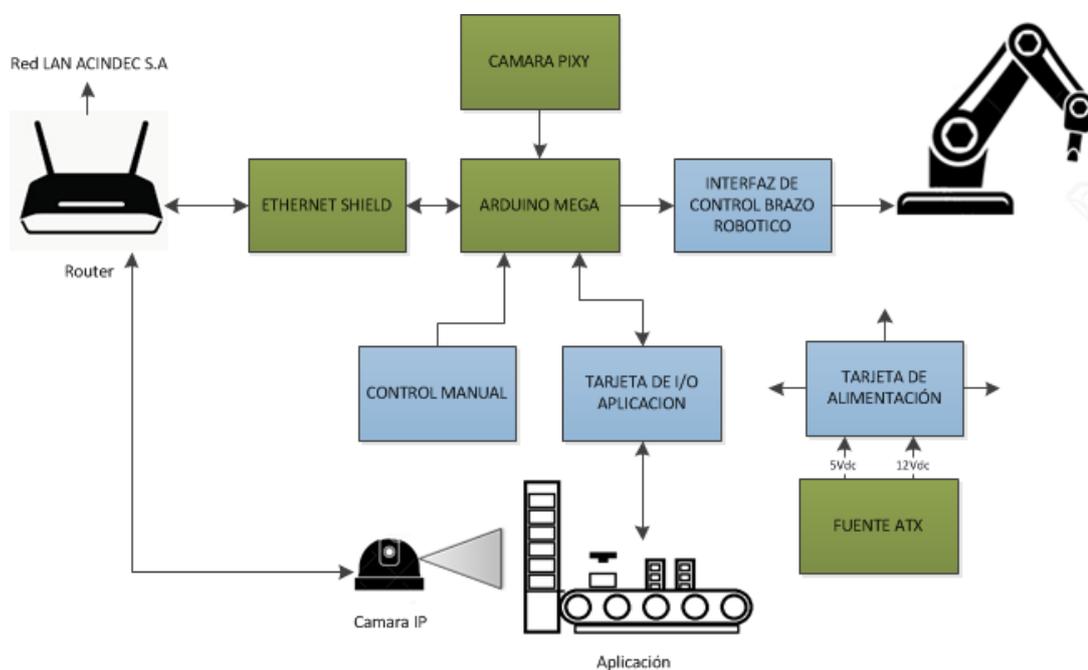


Figura 74: Diagrama de bloques del hardware.

3.2.2. Selección de elementos

Para seleccionar los diversos elementos que componen los diferentes circuitos para el funcionamiento del presente proyecto se realizan tablas de ponderaciones con un rango de evaluación entre 1 y 10, donde el mínimo (1) se le asignará a las características menos idóneas con las condiciones de diseño deseadas y el máximo (10) a aquellas características que si cumplan.

Tabla 10

Selección de los sensores para la detección de piezas.

	SENSORES INFRARROJOS	TIPO		
		QRD1114	CNY70	Barrera infrarroja
CARACTERÍSTICAS	Precisión	10	9	6
	Costo	9	9	7
	Facilidad de montaje	10	10	8
	Complejidad de circuito de acondicionamiento	9	9	8
	Promedio	9,50	9,25	7,25

Los sensores a utilizarse dentro de la aplicación son los QRD1114 por brindar mayor precisión en su señal.

Tabla 11

Selección del tipo de comunicación con la HMI.

	COMUNICACIÓN CON HMI	TIPO		
		USB	Ethernet	Puerto paralelo
CARACTERÍSTICAS	Disponibilidad en el mercado	10	10	7
	Acceso remoto	2	10	1
	Necesidad de computador fijo	1	10	1
	Capacidad inalámbrica	1	10	1
	Promedio	3,50	10,00	2,25

La comunicación seleccionada es la Ethernet ya que permite un acceso remoto y comunicación inalámbrica entre la HMI y el controlador.

Tabla 12

Selección de los módulos para el control.

	MÓDULOS DE CONTROL	TIPO		
		Circuito microcontrolado	Arduino	Raspberry PI
CARACTERÍSTICAS	Costo	9	10	6
	Disponibilidad en el mercado	9	9	5
	Tiempo de implementación	6	8	7
	Facilidad de implementación	7	10	9
	Compatibilidad con módulos adic.	8	9	8
	Promedio	7,8	9,2	7

El módulo seleccionado es la tarjeta Arduino MEGA, ya que posee las características necesarias para su implementación como controlador y debido a que su utilización fue solicitada por la empresa ya que ésta ya la adquirió previo a la realización de este proyecto.

Tabla 13

Selección de los módulos para el control.

	CÁMARA PARA VISIÓN ARTIFICIAL	MATERIAL		
		Web Cam	PIXY Cam CMU	ARDUINO Cam
CARACTERÍSTICAS	Costo	9	10	8
	Disponibilidad en el mercado	10	5	7
	Facilidad de montaje	9	7	7
	Facilidad de implementación	7	10	9
	Programación	7	9	9
	Facilidad de conexión	8	10	10
	Promedio	8,33	8,50	8,33

La PIXYcam CMU fue seleccionada como cámara para visión artificial, ya que posee las características necesarias para su implementación como cámara de visión artificial y su utilización fue solicitada por la empresa ya que ésta ya la adquirió previo a la realización de este proyecto.

Tabla 14

Selección de la cámara para monitoreo.

	CÁMARA MONITOREO	MATERIAL		
		Web Cam	Cámara IP	Cámara CCTV
CARACTERÍSTICAS	Costo	10	9	7
	Disponibilidad en el mercado	10	10	8
	Facilidad de montaje	10	10	10
	Facilidad de implementación	10	9	8
	Acceso remoto	4	10	2
	Capacidad de movimiento remoto	0	10	0
	Promedio	7,33	9,67	5,83

Se seleccionó la cámara IP como cámara para monitoreo por su acceso y capacidad de movimiento remoto.

3.2.3. Descripción de los bloques del hardware

3.2.3.1. Tarjeta de alimentación

La placa diseñada para la alimentación del sistema consta de varias salidas de 5Vdc y 12Vdc para proveer el voltaje necesario a los distintos elementos del sistema, tomando como entrada la alimentación de una fuente ATX comercial.

Esta tarjeta consta de un interruptor de contacto por llave el cual permite energizar y desenergizar el sistema, y que solo el personal autorizado tenga acceso a la manipulación del brazo robótico y la aplicación; adicionalmente cuenta con un pulsador normalmente cerrado el cual al ser presionado desenergizará el sistema actuando como paro de emergencia.

- **Cálculos de resistencias**

Para este circuito se realizó el cálculo de las resistencias necesarias para alimentar a los led indicadores con 5Vdc y 12Vdc, este cálculo se lleva a cabo mediante la fórmula de la Ley de ohm.

$$V = I \cdot R$$

Dónde:

<i>V: Voltaje</i>	<i>[V]</i>
<i>I: Corriente</i>	<i>[mA]</i>
<i>n: Resistencia</i>	<i>[Ω]</i>

a) Resistencia para Led Indicador Sistema Activado

Datos:

$$V_{out \text{ Arduino MEGA}} = 12 \text{ Vdc}$$

$$I_{Led} = 15 \text{ mA}$$

$$V_{Led} = 2 \text{ Vdc}$$

$$R = \frac{V_{out \text{ Arduino MEGA}} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{12\text{Vdc} - 2\text{Vdc}}{0.015\text{A}} = 666.66\Omega \approx 680\Omega$$

b) Resistencia para Led Indicador Salida 5Vdc

Datos:

$$V_{out \text{ Arduino MEGA}} = 5 \text{ Vdc}$$

$$I_{Led} = 15 \text{ mA}$$

$$V_{Led} = 2 \text{ Vdc}$$

$$R = \frac{V_{out \text{ Arduino MEGA}} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{5\text{Vdc} - 2\text{Vdc}}{0.015\text{A}} = 200\Omega \approx 220\Omega$$

c) Resistencia para Led Indicador Salida 12Vdc

Datos:

$$V_{out \text{ Arduino MEGA}} = 12 \text{ Vdc}$$

$$I_{Led} = 15 \text{ mA}$$

$$V_{Led} = 2 \text{ Vdc}$$

$$R = \frac{V_{out \text{ Arduino MEGA}} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{12\text{Vdc} - 2\text{Vdc}}{0.015\text{A}} = 666.66\Omega \approx 680\Omega$$

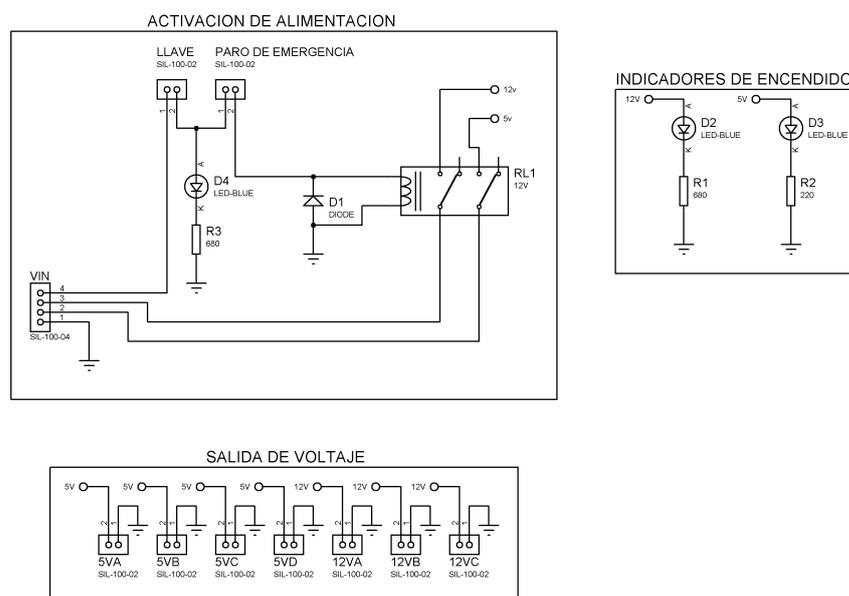


Figura 75: Diagrama esquemático de la tarjeta de alimentación.

3.2.3.2. Interfaz de control brazo robótico

La placa de interfaz de control permite la fácil interconexión de los servomotores del brazo robótico con el módulo Arduino MEGA para su respectivo control y alimentación, además cuenta con conectores para las diferentes luces indicadoras que muestran el modo de funcionamiento actual del robot: control manual, control web, aplicación en ejecución.

En esta tarjeta no se incluirán protecciones como optoacopladores para la conexión entre el Arduino y los servomotores, debido a que esta tarjeta ya cuenta con las protecciones adecuadas para el acople seguro entre estos.

- **Cálculo de la resistencia led indicador tarjeta de interfaz activada**

Para este circuito se realizó el cálculo de las resistencias necesarias para alimentar a los led indicadores desde las salidas digitales del módulo Arduino MEGA con 5Vdc, este cálculo se lleva a cabo mediante la fórmula de la Ley de ohm.

$$V = I \cdot R$$

Dónde:

<i>V: Voltaje</i>	<i>[V]</i>
<i>I: Corriente</i>	<i>[mA]</i>
<i>n: Resistencia</i>	<i>[Ω]</i>

Datos:

$$V_{out \text{ Arduino MEGA}} = 5 \text{ Vdc}$$

$$I_{Led} = 5 \text{ mA}$$

$$V_{Led} = 2 \text{ Vdc}$$

$$R = \frac{V_{out \text{ Arduino MEGA}} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{5 \text{ Vdc} - 2 \text{ Vdc}}{0.015 \text{ A}} = 200 \Omega \approx 220 \Omega$$

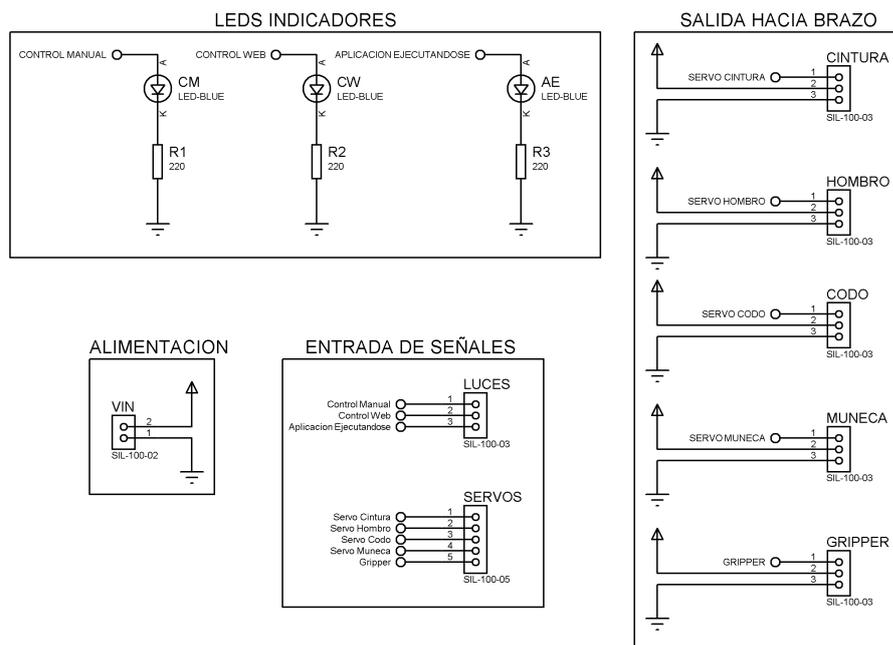


Figura 76: Diagrama esquemático de la tarjeta de interfaz.

3.2.3.3. Control manual

El control manual consta de varios botones los cuales permiten variar el ángulo de cada una de las articulaciones del brazo robótico, además de abrir y cerrar el gripper, enviando un pulso a las entradas digitales del módulo Arduino MEGA mediante la configuración Pull Down, cuya resistencia no se toma en cuenta en el cálculo ya que la única premisa para su diseño es que la resistencia debe ser lo suficientemente alta para no influir en el circuito, por lo general se utilizan resistencias de $10k\Omega$ así que se toma este valor para el diseño de este circuito.

Este circuito también consta de un led que se enciende para mostrar que control está activado.

- **Cálculo de resistencias led indicador de control manual activado**

Para este circuito se realizó el cálculo de la resistencia necesaria para alimentar al led indicador desde las salidas digitales del módulo Arduino MEGA con 5Vdc, este cálculo se lleva a cabo mediante la fórmula de la Ley de ohm.

$$V = I \cdot R$$

Dónde:

<i>V: Voltaje</i>	<i>[V]</i>
<i>I: Corriente</i>	<i>[mA]</i>
<i>n: Resistencia</i>	<i>[Ω]</i>

Datos:

$$V_{out \text{ Arduino MEGA}} = 5 \text{ Vdc}$$

$$I_{Led} = 15 \text{ mA}$$

$$V_{Led} = 2 \text{ Vdc}$$

$$R = \frac{V_{out \text{ Arduino MEGA}} - V_{Led}}{I_{Led}} = \frac{5 \text{ Vdc} - 2 \text{ Vdc}}{0.015 \text{ A}} = 200 \Omega \approx 220 \Omega$$

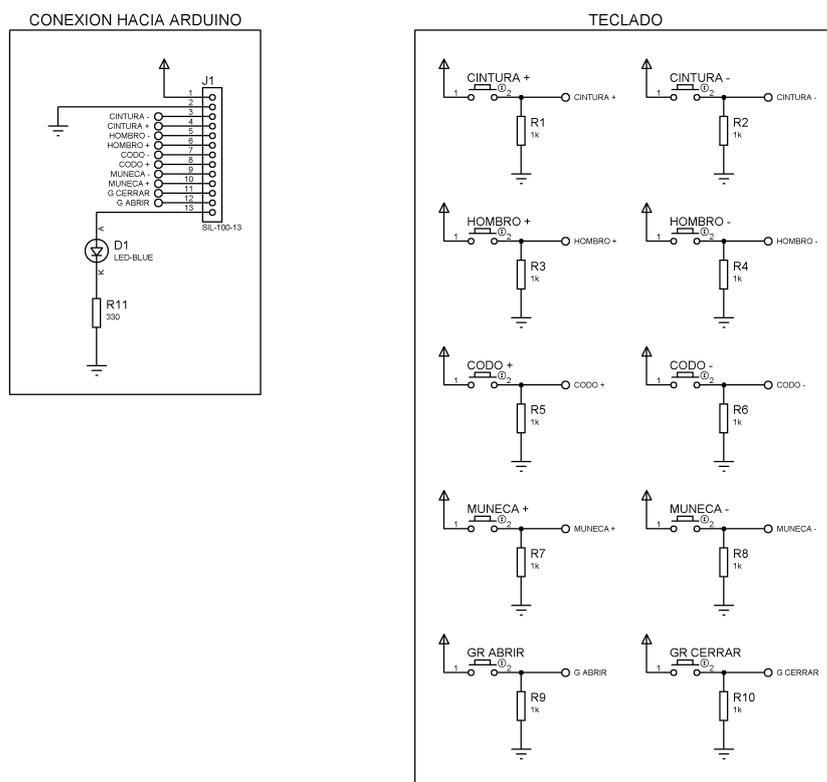


Figura 77: Diagrama esquemático del control manual.

3.2.3.4. Tarjeta de I/O de la aplicación

Esta tarjeta permite la interconexión entre los servomotores y sensores presentes en el módulo de aplicación con el módulo Arduino MEGA, esta placa se compone de los conectores necesarios para los servomotores y sensores además del respectivo acondicionamiento de señal para los sensores.

Los sensores permiten la detección de piezas en varias etapas del módulo de aplicación, como son en los dispensadores de piezas y en la banda transportadora.

Los sensores utilizados son los QRD1114, los cuales permiten obtener un cambio de voltaje cuando un objeto se aproxima, el acondicionamiento de señal se compone de un circuito integrado

74LS14 el cual es una compuerta inversora, al hacer pasar por estas compuertas la señal proveniente del sensor se estabilizan sus cambios de voltaje a 0Vdc (Cero Lógico) y 5Vdc (1 Lógico), con esto se logra mayor precisión en el sensado de las piezas.

Adicionalmente se incluye un led en el circuito para que indique que este está en funcionamiento.

- **Cálculo de resistencias**

Para este circuito se realizó el cálculo de las resistencias necesarias para alimentar al led indicador y el led del sensor, la resistencia pull up de la salida del sensor no se toma en cuenta en el cálculo ya que la única premisa para su diseño es que la resistencia debe ser lo suficientemente alta para no influir en el circuito, por lo general se utilizan resistencias de 10kΩ así que se toma este valor para el diseño de este circuito.

$$V = I \cdot R$$

Dónde:

<i>V: Voltaje</i>	<i>[V]</i>
<i>I: Corriente</i>	<i>[mA]</i>
<i>n: Resistencia</i>	<i>[Ω]</i>

a) Resistencia para Led Indicador

Datos:

$$V_{alimentación} = 5 Vdc$$

$$I_{Led} = 15 mA$$

$$V_{Led} = 2 Vdc$$

$$R = \frac{V_{\text{alimentación}} - V_{\text{Led}}}{I_{\text{Led}}} = \frac{5V_{\text{dc}} - 2V_{\text{dc}}}{0.015A} = 200\Omega \approx 220\Omega$$

b) Resistencia para Led del sensor QRD1114

Datos:

$$V_{\text{alimentación}} = 5V_{\text{dc}}$$

$$I_{\text{Led}} = 15\text{ mA}$$

$$V_{\text{Led}} = 2V_{\text{dc}}$$

$$R = \frac{V_{\text{alimentación}} - V_{\text{Led}}}{I_{\text{Led}}} = \frac{5V_{\text{dc}} - 2V_{\text{dc}}}{0.015A} = 200\Omega \approx 220\Omega$$

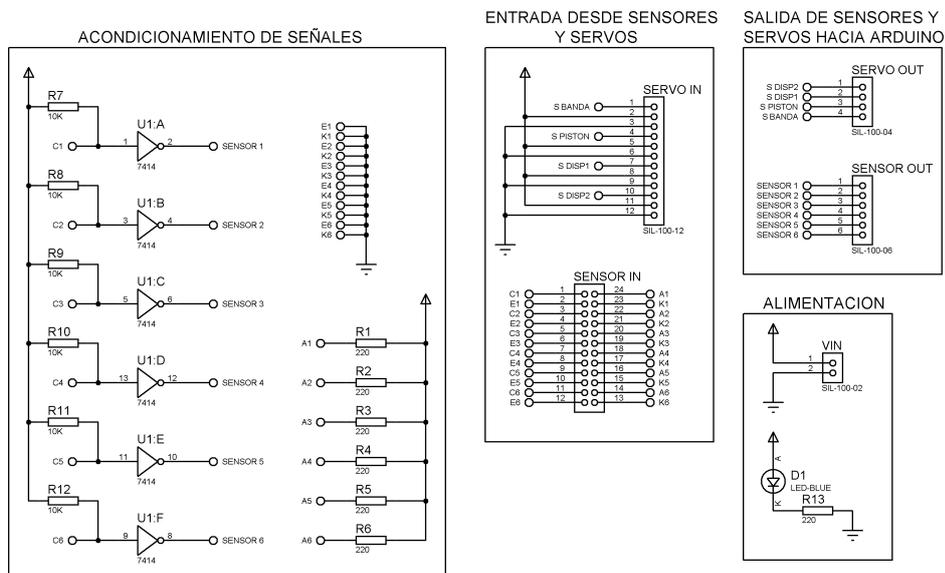
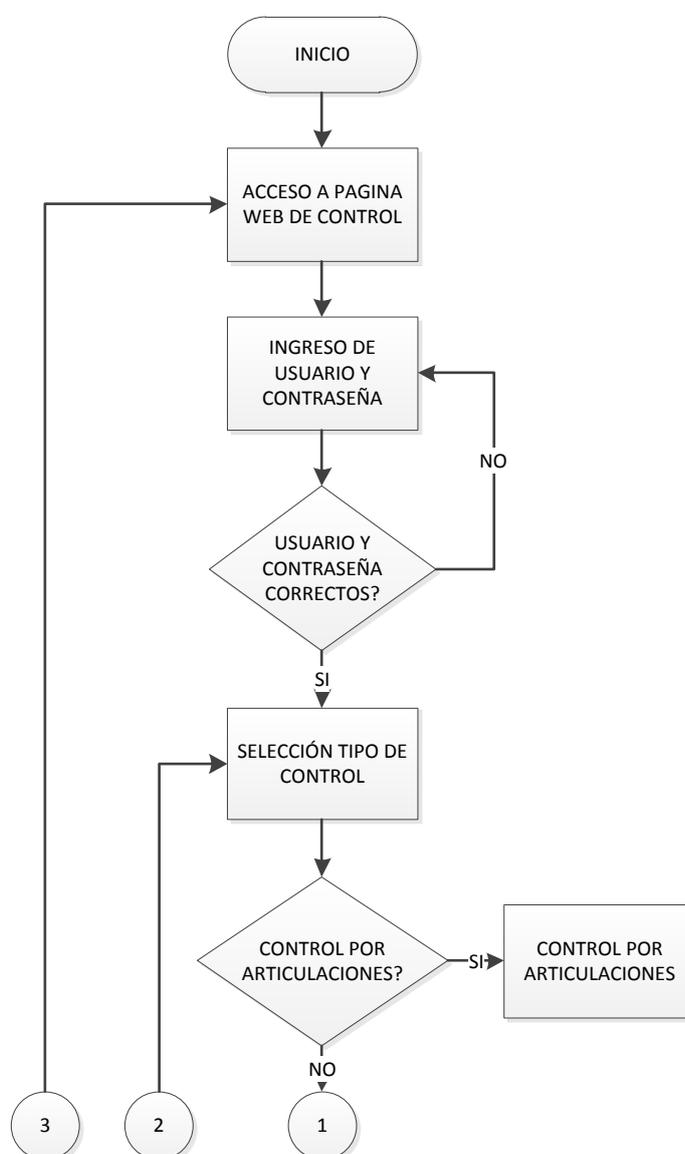


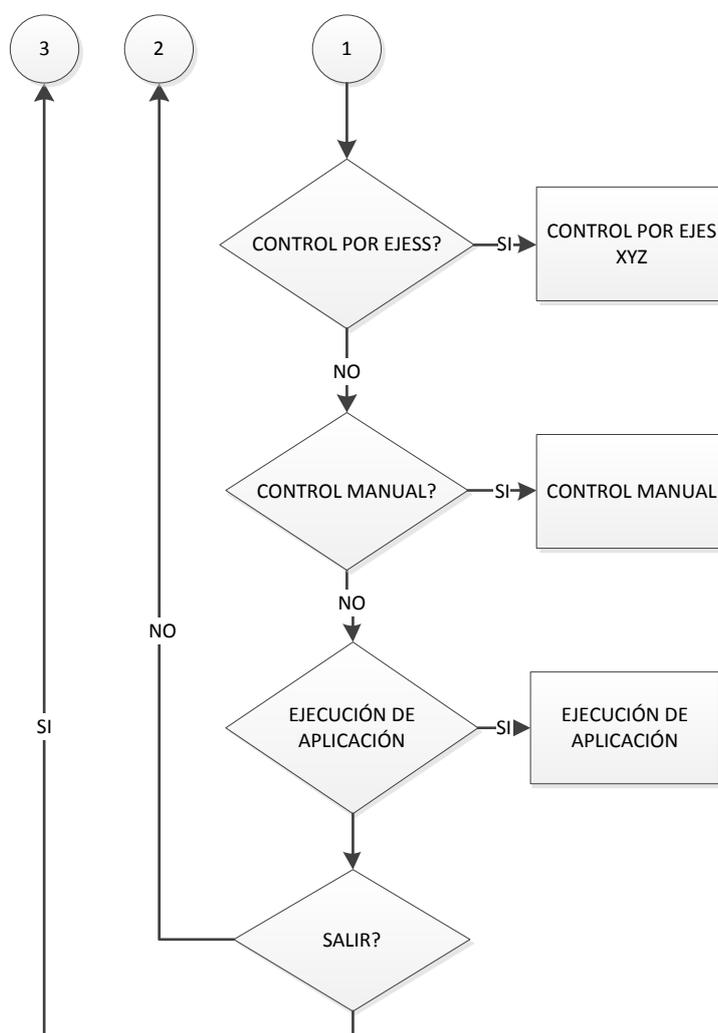
Figura 78: Diagrama esquemático de la tarjeta de I/O de la aplicación.

3.3. Diseño de control

3.3.1. Diagrama de flujo General

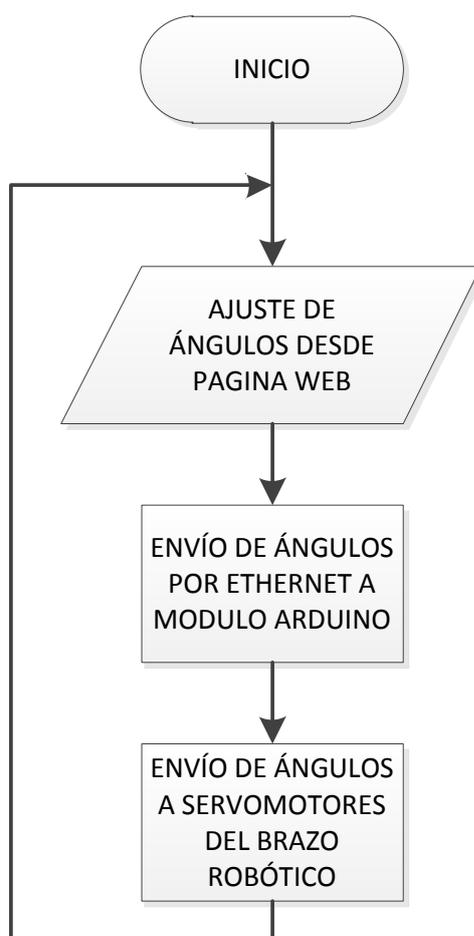
El diagrama de flujo general muestra de una manera gráfica la estructura secuencial del desarrollo del software del presente proyecto, con lo que se puede tener una idea general del procedimiento para su elaboración y por ende entender mejor su funcionamiento.





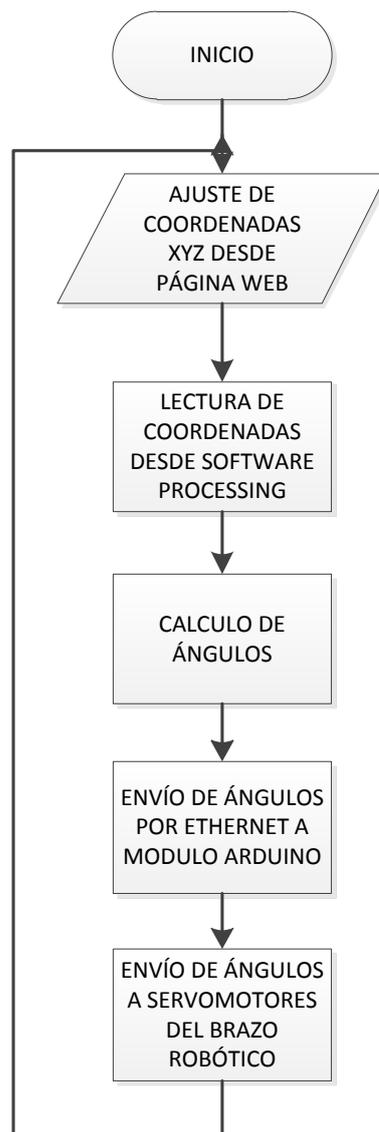
3.3.2. Diagrama de flujo Control por Articulaciones

El diagrama de flujo del control por articulaciones indica la secuencial del software a desarrollarse en el *software de control*.



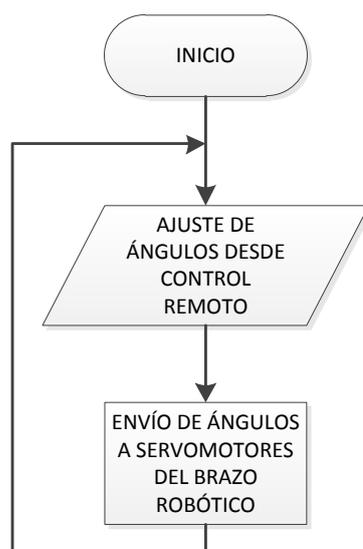
3.3.3. Diagrama de flujo Control por Ejes XYZ

En éste diagrama de flujo se indica la secuencial del software a desarrollarse del control por ejes XYZ dentro del *software de control*.



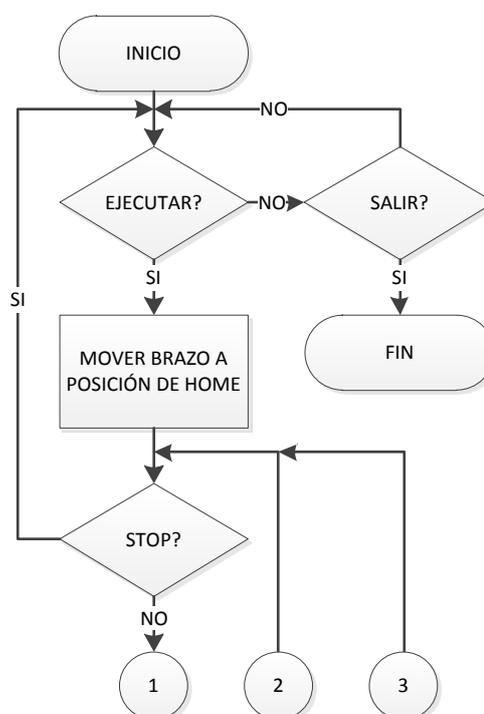
3.3.4. Diagrama de flujo Control Manual

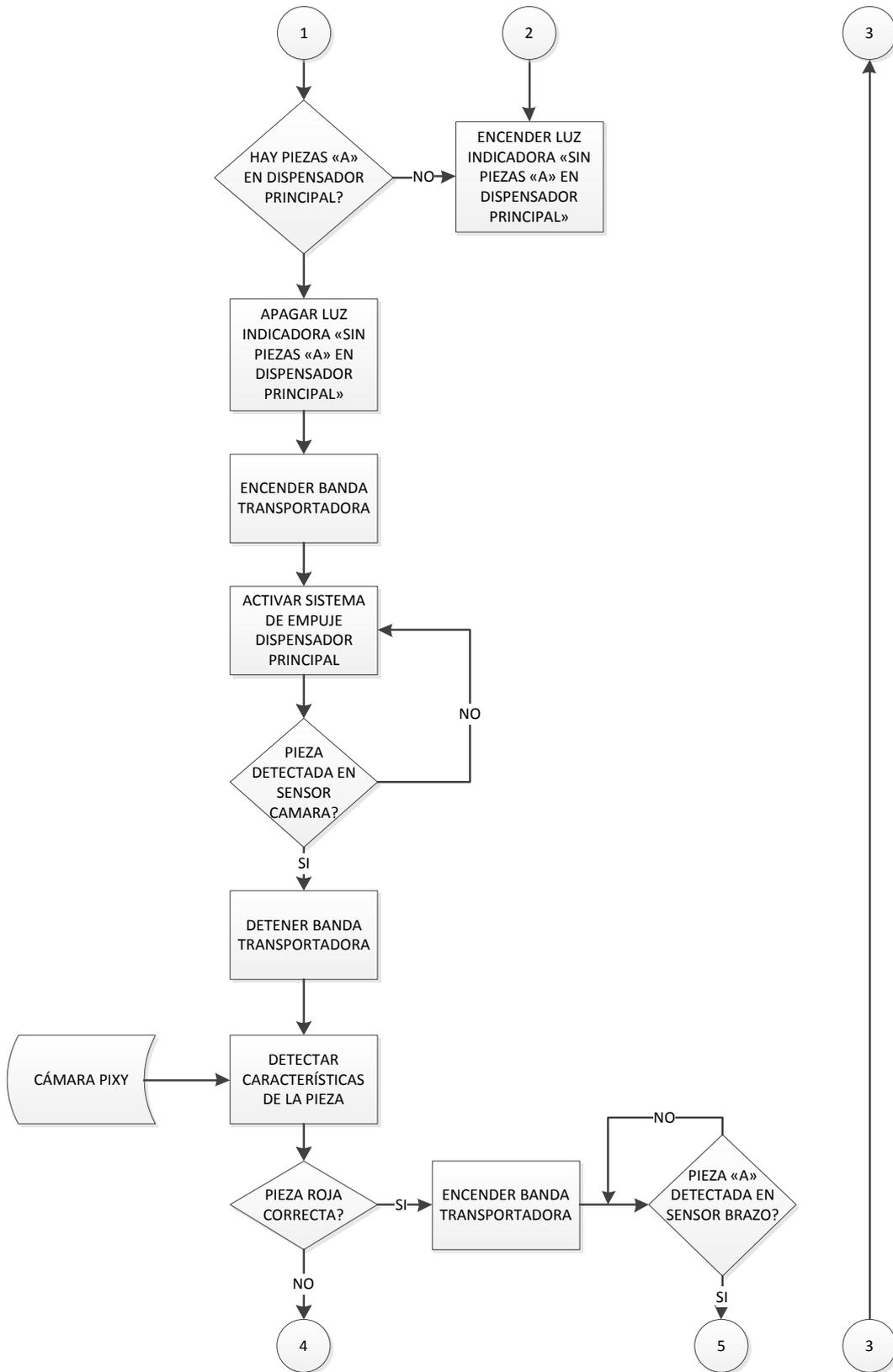
Éste diagrama de flujo muestra la estructura secuencial del desarrollo del software del control manual en el *firmware de control*.

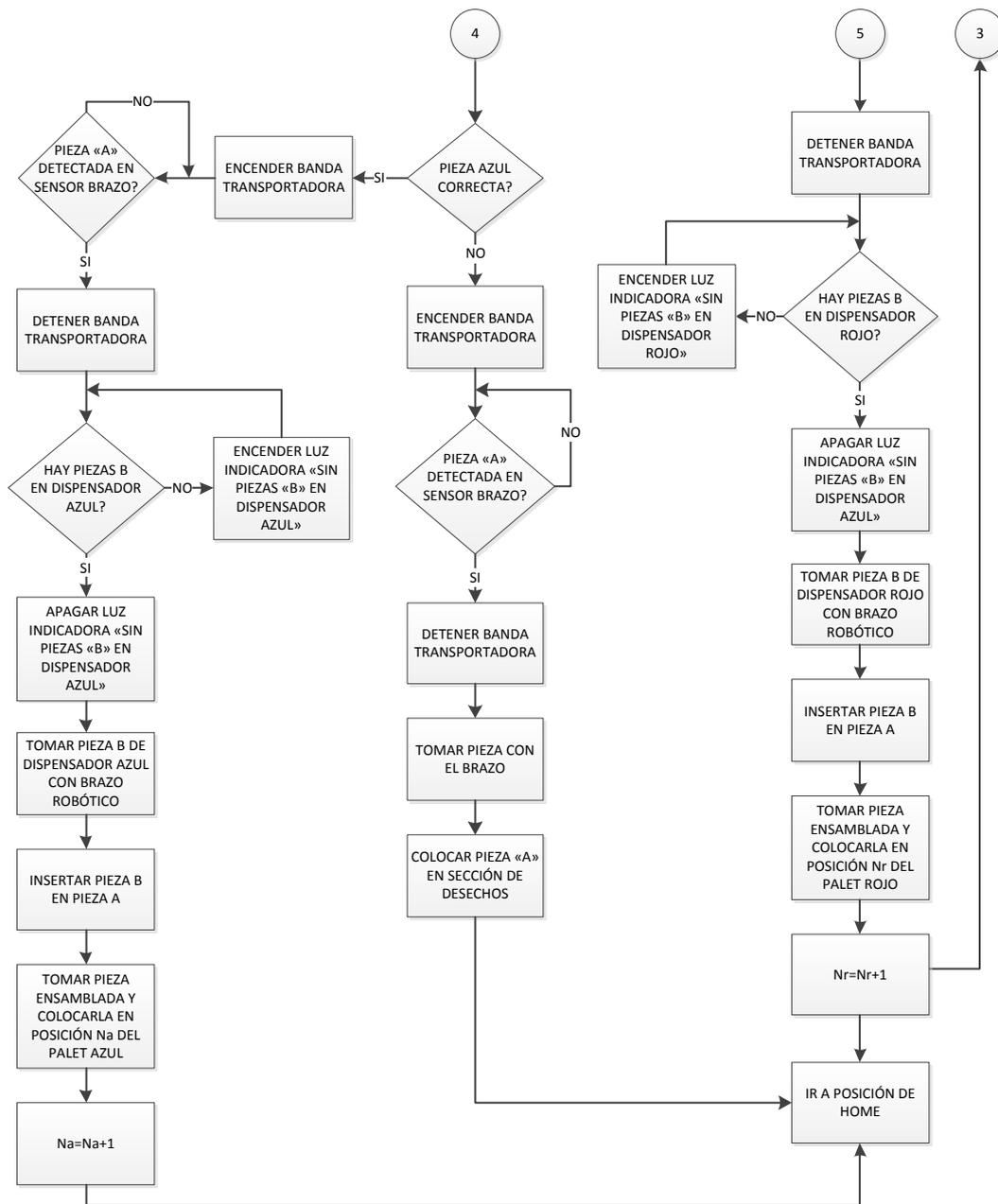


3.3.5. Diagrama de flujo Aplicación

Mediante el diagrama de flujo aplicación se muestra la secuencia del desarrollo de su software dentro del *firmware de control*.







CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN

4.1. Implementación mecánica

4.1.1. Módulo de aplicación

En la *Figura 79*, se observan las partes principales que conforman el módulo aplicación, las cuales se explicarán a detalle más adelante. Este módulo se lo fabricó para la ejecución de la “aplicación demostrativa” que desarrolla el brazo robótico como parte de este proyecto.

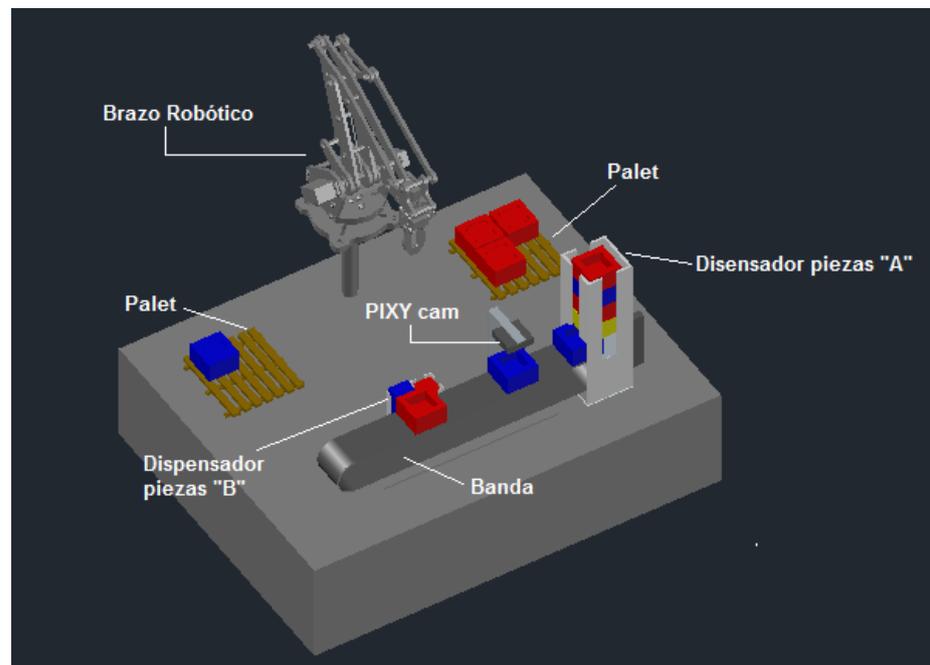


Figura 79: Layout de las partes que componen el módulo aplicación.

El módulo de aplicación se construyó en acrílico transparente y negro, en la *Figura 80* se observan las partes de ésta obteniéndolas de la plancha de acrílico después de su corte.

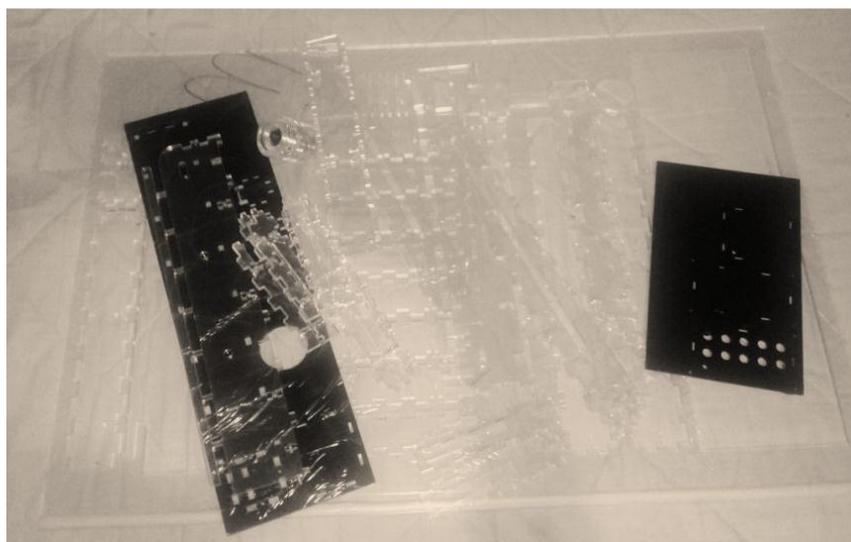


Figura 80: Pieza en acrílico del módulo de aplicación.

4.1.2. Rodillos

Los rodillos para la banda transportadora se constituyen de 4 ruedas de acrílico de 12mm de espesor cada una, dando a cada rodillo una longitud de 48mm con un diámetro externo de 50mm; en cada uno de ellos se colocó rodamientos 8-22 en sus ruedas externas y posteriormente su eje (varilla roscada 5/16" de diámetro y 80mm de longitud) sujeta a los rodamientos con tuercas. Estos rodillos fueron recubiertos con caucho para aumentar la fricción entre estos y la banda.



Figura 81: Ensamble rodillos, rodamientos y eje.

4.1.2.1. Banda transportadora

La cinta para la banda transportadora fue obtenida de un cinturón de seguridad (nylon poliamida), tiene un ancho de 50mm, 1mm de espesor y fue cortado para obtener la longitud requerida (860 mm de longitud total); luego se procedió a coser sus extremos entre sí para posteriormente colocarla en los rodillos.



Figura 82: Cinturón de seguridad como cinta para la banda transportadora.

4.1.2.2. Soporte banda transportadora

Las partes que conforman el soporte de la banda transportadora son de acrílico de 6mm de espesor, los cuales se unieron entre sí junto con los rodillos y banda por mayor facilidad de ensamble entre ellos; las partes de los soportes fueron unidas y ajustadas entre sí con tornillos M3x15 y sus respectivas tuercas.



Figura 83: Ensamble entre rodillos y banda transportadora.

Una vez colocado todo en su lugar, se ajustan los ejes de los rodillos al soporte con tuercas, excepto el rodillo que hace de tambor motriz, el cual fue acoplado al motor y éste a su vez al soporte.



Figura 84: Ensamble final banda transportadora.

4.1.2.3. Piezas de la aplicación

Se cortaron las partes de cada una de las piezas “A” y “B” en madera contrachapada (triplex), luego se armó y pulió cada una de ellas para posteriormente pintarlas de los colores que se designaron para la aplicación.



Figura 85: Piezas “A” y “B” armadas y pulidas.

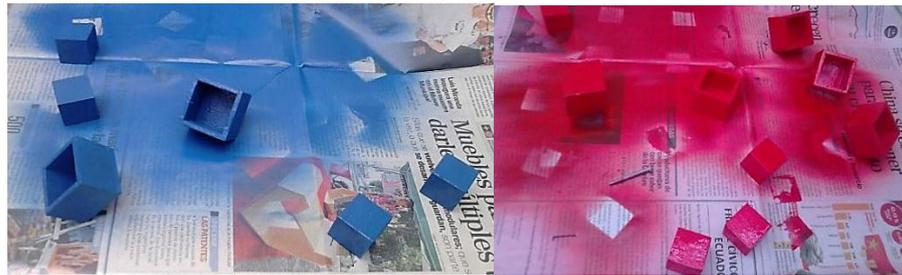


Figura 86: Piezas “A” y “B” pintadas.

4.1.2.4. Dispensador piezas “A”

Las partes del dispensador piezas “A” son de acrílico de 6mm de espesor el cual en su parte baja contiene el sistema de empuje previamente armado para facilidad de ensamble.

- **Sistema de empuje**

Las partes del sistema de empuje (mecanismo de retorno rápido) son de acrílico de 4 mm de espesor, ensamblado como se muestra en la *Figura 85*.



Figura 87: Ensamble sistema de empuje

Una vez listo el ensamble del sistema de empuje se procede a unir las partes del dispensador piezas “A” junto con dicho sistema,

las partes del dispensador son unidas entre sí mediante tornillos M3x15 y sus respectivas tuercas.

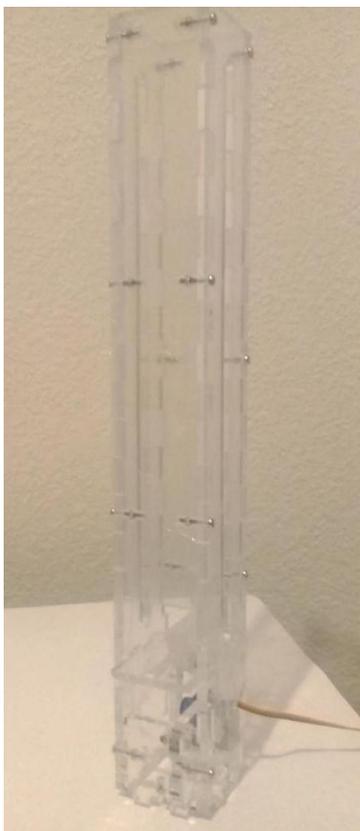


Figura 88: Ensamble final dispensador piezas “A”

4.1.2.5. Dispensador piezas “B”

Las partes del dispensador piezas “B” son de acrílico de 6mm de espesor, el cual contiene el sistema de elevación previamente armado para facilidad de ensamble.

- **Sistema de elevación**

Las partes del sistema de elevación son de acrílico de 2 mm de espesor para las partes que componen la polea motriz y 8mm la base sobre la cual se colocará las piezas “B”, esta base será

soportada por hilo nylo de 0,25mm y se ensambló como se muestra en la *Figura 89*.

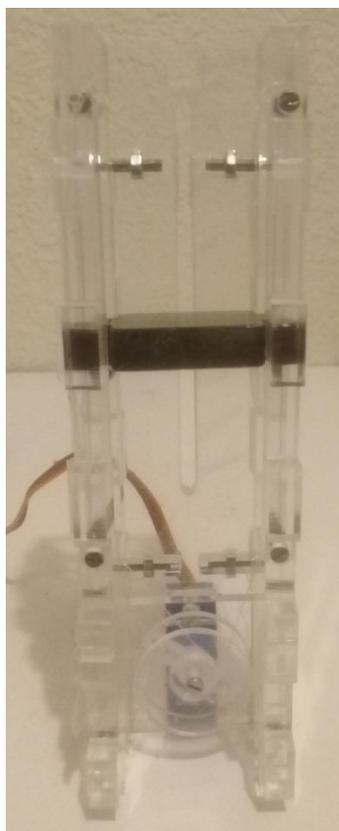


Figura 89: Ensamble sistema de elevación por poleas

Una vez listo el ensamble del sistema de elevación se procede a unir las partes del dispensador piezas “B” junto con dicho sistema, las partes del dispensador son unidas entre sí mediante tornillos M3x15 y sus respectivas tuercas.



Figura 90: Ensamble final dispensador piezas "B"

4.1.2.6. Base del módulo de aplicación.

Sobre ésta base se montan los ensambles explicados anteriormente para darle mayor estabilidad a todo el sistema, estos se sujetan a la base con tornillos M3x15 y sus respectivas tuercas; además permite ser fácilmente montado y desmontado de la mesa de trabajo de robot.

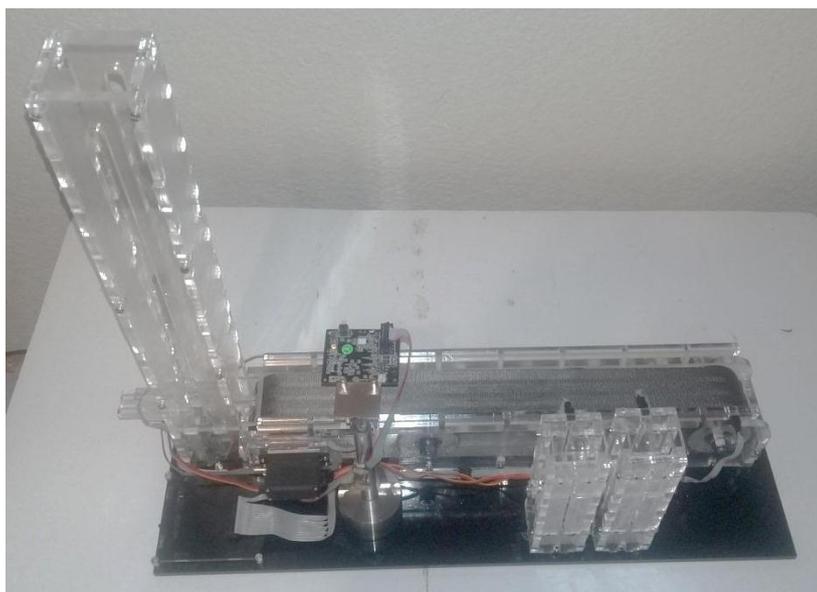


Figura 91: Ensamble final del módulo de aplicación

4.1.2.7. Contenedor de desecho

Las partes del contenedor de desecho se cortaron en madera contrachapada (triplex).



Figura 92: Contenedor de desecho.

4.1.2.8. Palets

Las partes que conforman los palets fueron cortadas en madera contrachapada (triplex), cada una de ellas mide 10,6 x 0,9cm, y posteriormente se las unió dando forma al palet.

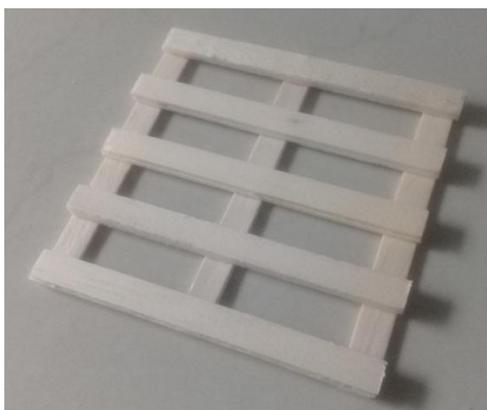


Figura 93: Palet

4.1.2.9. Cajas para circuitos

- **Caja de la tarjeta I/O de la aplicación**



Figura 94: Caja de la tarjeta I/O de la aplicación.

El espesor de las piezas de esta caja es de 3mm y una vez ensamblada, la caja es montada sobre la base del módulo de aplicación como muestra la *Figura 91*.

- **Caja del control manual**



Figura 95: Caja del control manual.

Las piezas de esta caja fueron realizadas en un espesor de 3mm y dicha caja con el respectivo circuito en su interior será montada sobre la mesa de trabajo del robot.

4.2. Implementación electrónica

Los circuitos y sus respectivas placas se diseñaron en un software de desarrollo de PCB's (printed circuits boards); las pistas de los circuitos se rutearon en placa de fibra de vidrio de una sola cara cubierta de cobre, y sobre la otra cara se estampó las descripciones y componentes respectivos de cada placa, dando una mejor apariencia y guía al momento de colocar sus componentes en cada una de ellas.

4.2.1. Tarjeta de alimentación

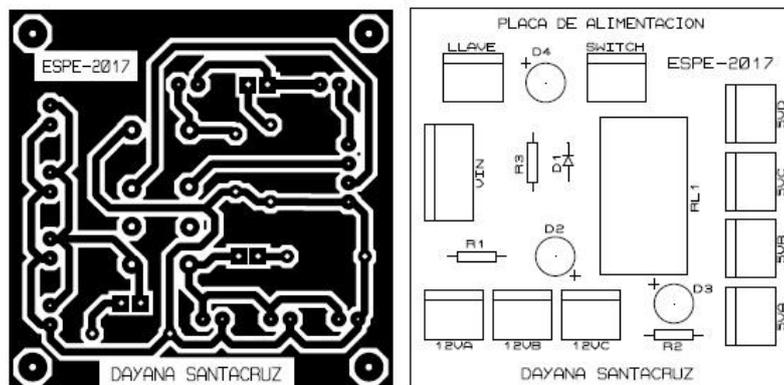


Figura 96: Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de alimentación.

La placa de ésta tarjeta es de 5x5cm, posteriormente a su diseño se perforo la placa para poder colocar ordenadamente cada uno de sus elementos y ser soldados.

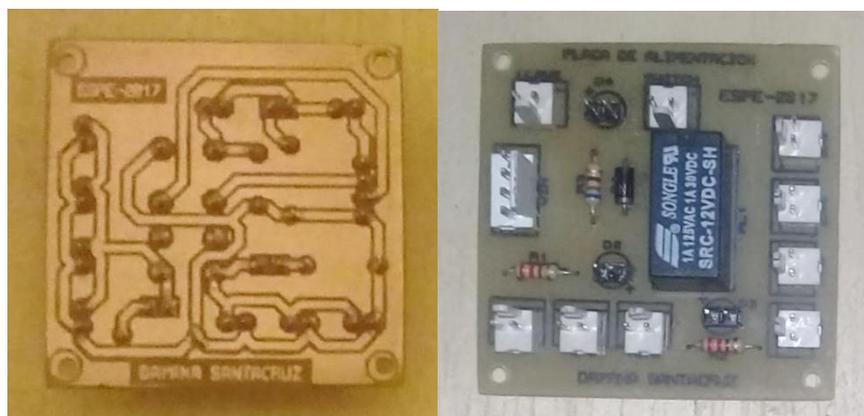


Figura 97: Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de alimentación.

4.2.2. Interfaz de control brazo robótico

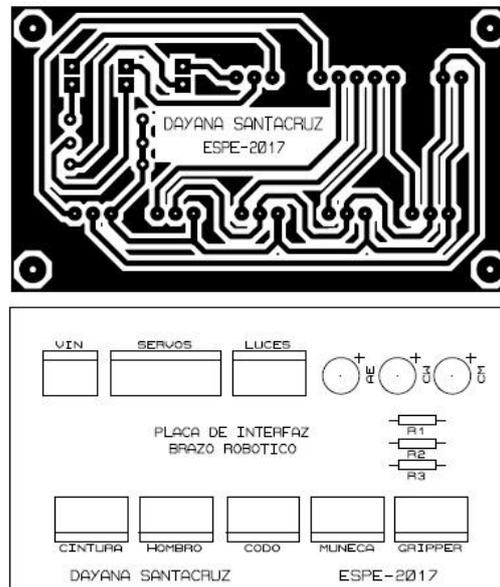


Figura 98: Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de interfaz de control.

La placa de la interfaz de control es de 4x7cm, en ella luego de su respectivo diseño se perforo la placa y colocó cada uno de sus elementos ordenadamente y se los soldó.

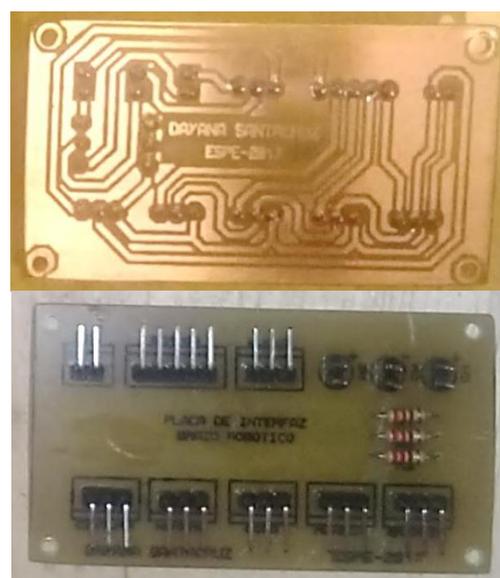


Figura 99: Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de interfaz de control.

4.2.3. Control manual

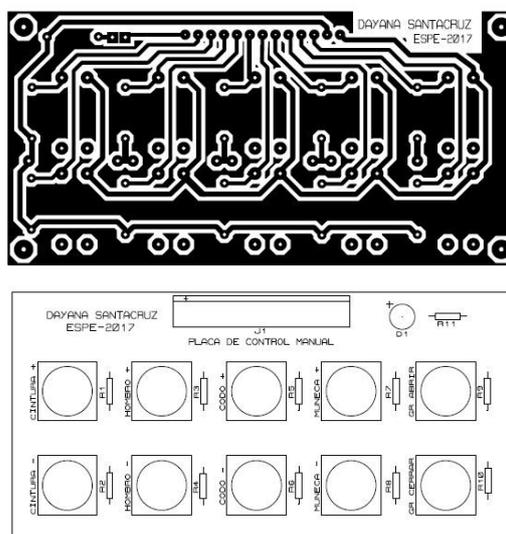


Figura 100: Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta del control manual.

La placa del control manual es de 5x10cm, en ella posterior a su diseño se perforo la placa y colocó ordenadamente cada uno de sus elementos para ser soldados. Una vez lista la placa se procedió a montarla en su respectiva caja.



Figura 101: Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta del control manual.

4.2.4. Tarjeta de I/O de la aplicación

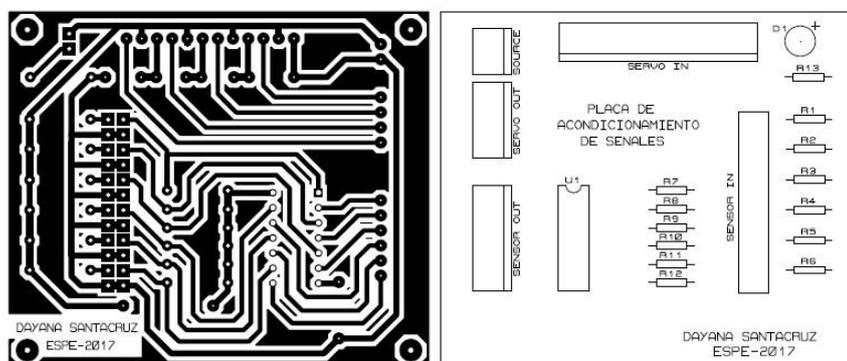


Figura 102: Pistas y descripción de los componentes de la tarjeta de I/O de la aplicación.

La placa de I/O de la aplicación es de 6x7cm, se perforo la placa y colocó cada uno de sus elementos para ser soldados posteriormente a la realización de su diseño. Ésta tarjeta una vez lista se procedió a montarla en su respectiva caja.

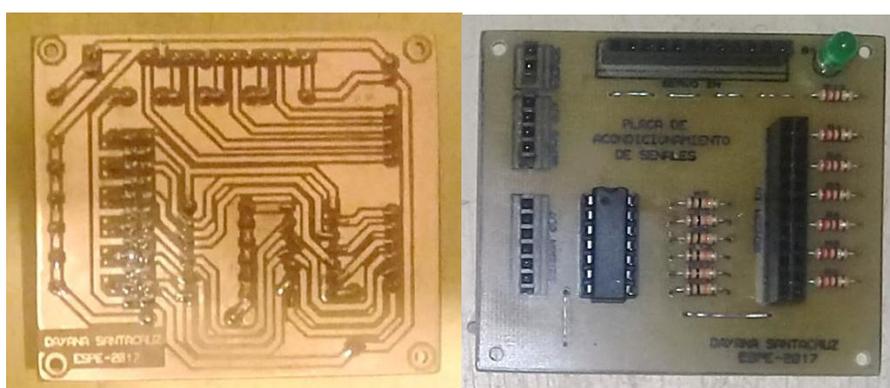


Figura 103: Pistas, soldadura y elementos de la tarjeta de I/O de la aplicación.

4.3. Implementación del control

4.3.1. HMI Web

Mediante ésta interfaz web se podrá acceder al control de los diversos modos de operación del brazo robótico, cada uno de los cuales serán explicados posteriormente; ésta interfaz, creada con el lenguaje de programación web *HTML5* y *PHP*, envía los datos indicados por el usuario en un archivo de texto y es guardado en la “nube” para que puedan ser obtenidos por cualquier computador conectado a la red LAN de la empresa, dichos archivos son extraídos a través del software *Processing* el cual lee estos datos y los procesa de la manera indicada para posteriormente enviarlos al módulo Arduino MEGA el cual se encargará de transmitir los datos a los diferentes elementos de hardware.

4.3.1.1. Pantalla de acceso

Es la pantalla principal de la plataforma web de control del brazo robótico, desde ésta se accede al menú de funciones del presente proyecto, para lo cual el operador debe ingresar el respectivo nombre de usuario y contraseña del sistema.



Figura 104: Página principal de la HMI.

4.3.1.2. Menú de funciones

En esta pantalla se tiene la lista de los diferentes tipos de control para el sistema del brazo robótico a manera de botones, los cuales al ser pulsados accederán a las diferentes pantallas de control; al apuntar el cursor del mouse sobre cada botón se observará una breve descripción del tipo de control al que se accede presionando dicho botón, adicionalmente existe un botón de salir el cual detendrá el sistema y regresará a la pantalla principal.



Figura 105: Menú de funciones de la HMI.

- **Control por articulaciones**

En esta pantalla se tienen controles tipo slider los cuales permitirán girar cada una de las articulaciones desde su ángulo mínimo hasta su máximo permitido, de la misma manera se tiene un control para abrir y cerrar el gripper del brazo, también se dispone de un botón de “Home” el cual posiciona el brazo en dicha posición.

Existe un botón que permite abrir en una nueva ventana la pantalla de la cámara de monitoreo permitiendo manejar el robot de

manera remota dentro de la red LAN; por último se tiene un botón de “Regresar” el cual cierra el control actual y regresa a la pantalla del menú de funciones.



Figura 106: Interfaz para el control por articulaciones.

- **Control por ejes**

En esta página se tienen controles tipo slider los cuales permiten aumentar o disminuir los valores de las coordenadas X, Y, Z respectivamente, con lo cual el brazo se moverá a dichas coordenadas siempre y cuando estas estén dentro del rango de movimiento del robot, de lo contrario éste permanecerá en la última posición válida; de la misma manera se tiene un control para abrir y cerrar el gripper del brazo y también se dispone de un botón de “Home” el cual posiciona el brazo en dicha posición.

Existe un botón que permite abrir en una nueva ventana la pantalla de la cámara de monitoreo permitiendo manejar el robot de manera remota dentro de la red LAN, por último se tiene un botón de “Regresar” el cual cierra el control actual y regresa a la pantalla del menú de funciones.



Figura 107: Interfaz para el control por ejes.

- **Control manual**

Esta pantalla permite activar y desactivar el control manual que está presente en la mesa de trabajo del brazo robótico, este control manual permite girar cada una de las articulaciones del brazo robótico así como abrir y cerrar su gripper.

De igual manera se tiene un botón de “Regresar” el cual cierra el control actual y regresa a la pantalla del menú de funciones.



Figura 108: Interfaz para la activación y desactivación del control manual.

- **Aplicación demostrativa**

Esta pantalla permite iniciar y detener la aplicación demostrativa del brazo robótico.

Existe un botón que permite abrir en una nueva ventana la pantalla de la cámara de monitoreo permitiendo manejar el robot de manera remota dentro de la red LAN, por último se tiene un botón de “Regresar” el cual cierra el control actual y regresa a la pantalla del menú de funciones.



Figura 109: Interfaz para el control de la aplicación demostrativa.

4.3.2. Software de control

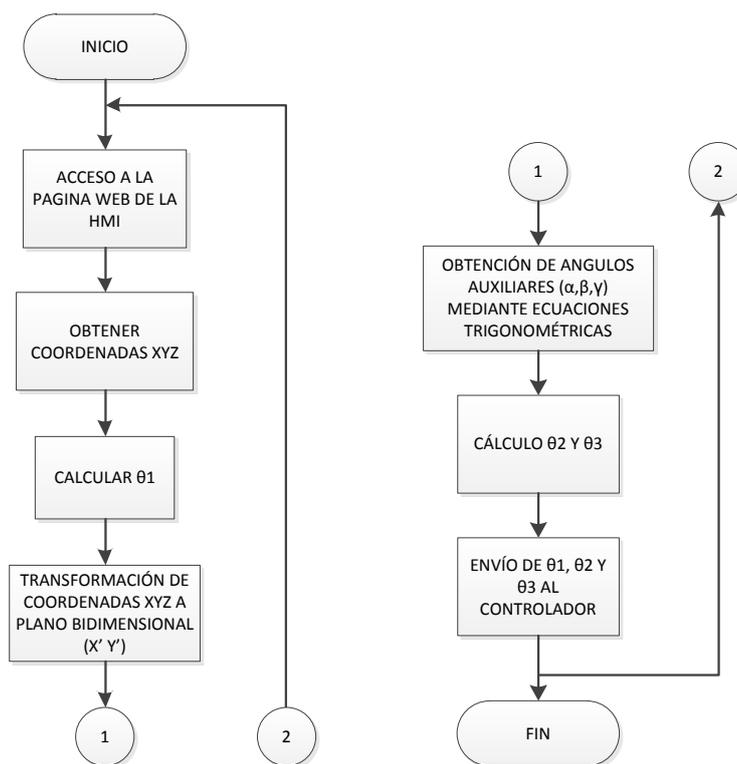
El software de control, realizado en el software *Processing*, permite, extraer los datos de los archivos de texto creados por la HMI y guardados en la “nube” para leerlos, procesarlos y posteriormente enviarlos al módulo Arduino MEGA; para la extracción de los datos, el software accede a la dirección web de la HMI (www.controlacindec.webutu.com) y sus respectivos subdirectorios, dirección la cual se encuentra dentro de su respectiva programación.

Los datos de los archivos de texto están en una variable del tipo *array* (vector), y son datos de posición o ángulos dependiendo del modo de control que se encuentre seleccionado en la HMI; si los datos son un *array* de ángulos, el software envía directamente dicho *array* al Arduino Mega, caso contrario, si los datos son un *array* de posición (XYZ) éste los separa y mediante la cinemática inversa (obtenida en el capítulo 3) que se encuentra dentro del programa obtiene los ángulos de dicha posición y los envía al Arduino Meda en un nuevo *array*.

Además de lo explicado anteriormente, el software envía al Arduino Mega los comandos para abrir y cerrar el gripper, así como los comandos para iniciar la ejecución de la aplicación y pararla, y también los comandos de activación o desactivación del control manual.

4.3.2.1. Resolución de la cinemática inversa del robot

Las ecuaciones obtenidas en la resolución de la cinemática inversa (ver sección 3.1.1.) son trasladadas a lenguaje de programación, para que el software *Processing* realice los cálculos respectivos.



4.3.3. Firmware de control

El firmware de control es la programación interna del Arduino Mega (controlador) que le permite recibir y leer los datos enviados desde el software *Processing* para procesarlos y enviar los comandos y valores adecuados a sus respectivos actuadores. Además dentro de este firmware se encuentra la programación de la aplicación demostrativa y del control manual.

La comunicación entre el controlador y el software de control es mediante Ethernet.

4.3.3.1. Comunicación Ethernet

Para establecer una comunicación Ethernet entre el módulo Arduino y la red LAN de la empresa, se requiere un módulo Shield Ethernet, el cual es una placa que se adapta fácilmente al Arduino

además de proveer las librerías necesarias para minimizar su programación.

A través de esta tarjeta se recibirán los datos provenientes del software de control por medio del protocolo UDP el cual es unidireccional y permite enviar paquetes de datos simples como son datos tipo texto, esto y su fácil programación lo hacen idóneo para esta aplicación además de ser requerimiento de la empresa.

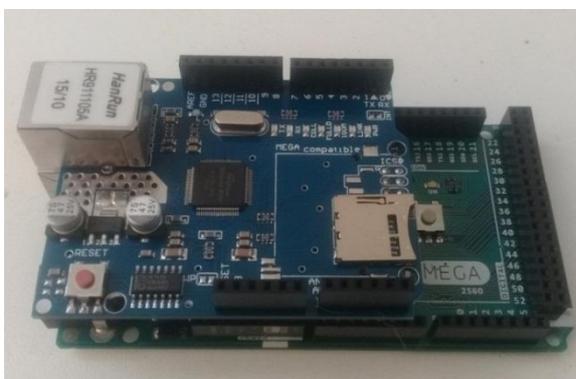
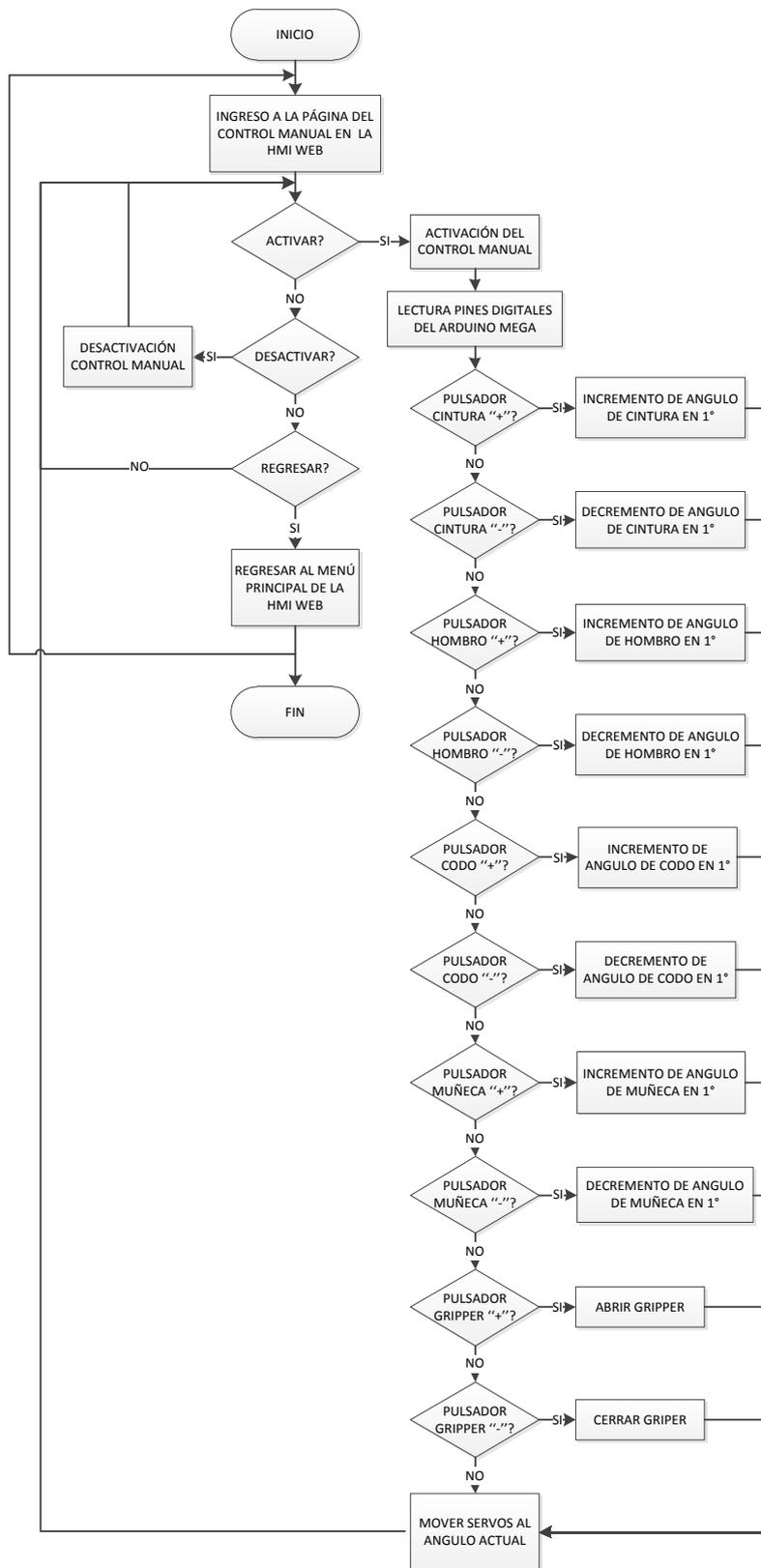


Figura 110: Módulo Ethernet-Arduino

4.3.3.2. Programación del control manual

Los pulsadores correspondientes al control manual, al ser presionados producen una activación lógica positiva en las respectivas entradas digitales del controlador (Aduino MEGA), el cual aumentará o disminuirá un grado al ángulo del servo correspondiente al pulsador cada vez que éste es presionado.

Esto se realiza a través de una serie de condiciones en los cuales el controlador se mantendrá haciendo un barrido de los pines digitales correspondientes a los pulsadores, luego de lo cual enviará el valor actual de cada ángulo a los servos correspondientes, ya sea que se hayan pulsado los botones o no, lo cual permite actualizar contantemente el valor deseado de ángulos y el brazo se mueva practicante en tiempo real



4.3.4. Cámara para visión artificial

Tabla 15

Características generales de la PIXY CMUcam.

CARACTERÍSTICA PIXY CMUCAM	
Dimensiones	2.1" x 2.0' 'x 1.4 "
Voltaje de operación	5V (USB) o 6V-10V (entrada no regulada)
Corriente de consumo	140mA
Tipo de comunicación	UART serial, SPI, I2C, USB
Dispositivo compatibles	Arduino, Raspberry PI, BeagleBone Black
Velocidad de procesamiento	50 cuadros por segundo
Resolución	640x400 pixeles
Cantidad de almacenamiento de información	7 firmas de color
Parámetros de salida	Código de color, firma de color, dimensiones del objeto y coordenadas del objeto dentro del campo de visión.

La PIXY CMUcam es una cámara la cual posee un pre-procesamiento de imagen para darle la aplicación específica de identificación, rastreo y medición, mediante bloques de color, en otras palabras, identifica los objetos por su color.

Esta cámara permite almacenar hasta 7 diferentes firmas de color, esto significa que puede reconocer objetos de 7 colores diferentes asignándoles a cada uno un número de identificación.



Figura 111: PIXY CMUcam.

Esta cámara brinda la facilidad de proveer librerías para trabajar con el módulo Arduino sin mayor complicación, este fue el motivo por el cual la empresa decidió adquirirla para el desarrollo del presente proyecto.

4.3.4.1. Identificación de objetos

La PIXY CMUcam toma la imagen proveniente de su cámara y la procesa mediante su hardware y firmware de procesamiento de imagen para entregar una salida tipo texto en la cual entrega los siguientes datos para un objeto detectado: código de objeto, posición dentro del cuadro de enfoque y dimensiones; esto lo realiza mediante I2C, la cual es una comunicación serial bidireccional de datos, y establece una relación Maestro- Esclavo entre dispositivos,

estableciendo en éste caso al Arduino Mega (controlador) como maestro y a la PIXY cam como esclavo.

En el presente proyecto se utiliza esta cámara para detectar el color de las piezas “A” (rojas y azules) asignándoles un código de firma para reconocer que éstas son las piezas de color correcto y así empatarla con la respectiva pieza “B” del mismo color para posteriormente ensamblarlas, o a su vez detectar piezas erróneas que no sean de uno de los colores aceptados por el sistema, adicionalmente se utiliza la cámara para detectar piezas defectuosas o rotas en base a sus dimensiones; con lo cual, la cámara enviará el dato del código de firma al módulo Arduino MEGA, el cual actuará de acuerdo al objeto detectado.

La programación de las firmas y la calibración de la imagen se realizan con el programa PixyMon.

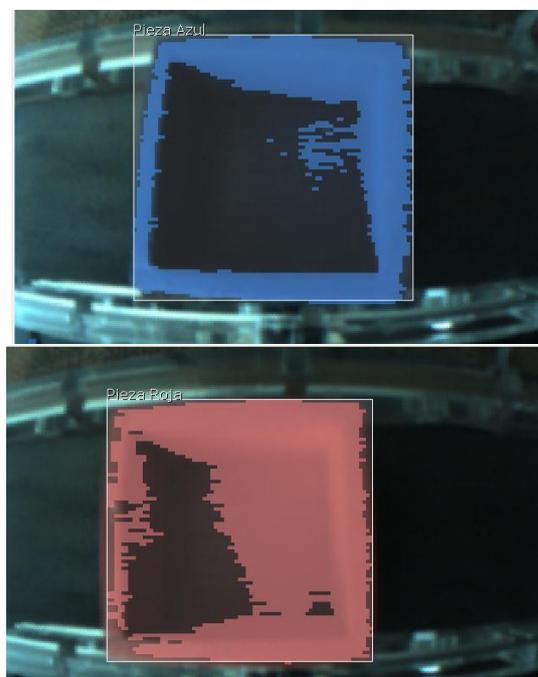


Figura 112: Piezas azul y roja detectadas con la PIXY cam.



Figura 113: Detección de piezas errónea con la PIXY cam.

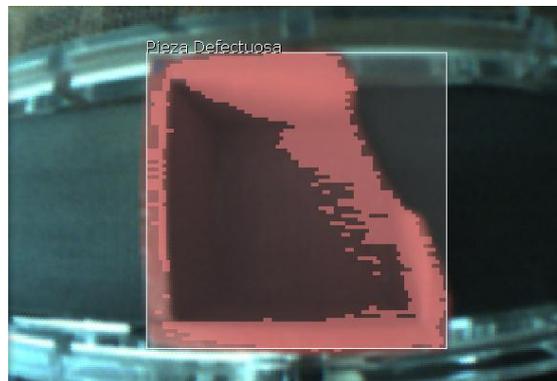


Figura 114: Detección de piezas defectuosa con la PIXY cam.

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Pruebas

5.1.1. Precisión de los ángulos de las articulaciones del brazo robótico

Se realizaron pruebas para verificar la exactitud de los ángulos medidos en los servos con respecto a los enviados desde la HMI, con lo cual se encontró el error absoluto de los ángulos para cada articulación.

Para la realización de esta prueba se utilizó el sensor acelerómetro de un Smartphone junto con una aplicación de medición de ángulo lo cual permitió obtener una medición más precisa que con un graduador convencional. Posteriormente se mostrarán los resultados obtenidos de esta prueba.

En esta prueba se tomaron 50 muestras de 3 diferentes ángulos para cada articulación.



Figura 115: Medición de ángulos

5.1.2. Precisión de las coordenadas XYZ del TCP del brazo robótico

Se realizaron pruebas para verificar la exactitud de las coordenadas XYZ del TCP del robot con respecto a las enviadas desde la HMI, con lo cual se encontró el error absoluto de cada coordenada.

Para la ejecución de esta prueba se tomaron mediciones de distancia desde el TCP hasta los ejes del sistema de coordenadas referencial del robot. Posteriormente se mostrarán los resultados obtenidos de esta prueba.

En esta prueba se tomaron 50 muestras de 3 diferentes puntos de coordenadas (xyz) para el TCP.



Figura 116: Medición de coordenadas

5.1.3. Velocidad de trabajo

5.1.3.1. Movimiento de las articulaciones del brazo

Se realizaron pruebas para determinar la velocidad de trabajo adecuada de los servos de cada articulación para que el sistema funcione de una manera segura.

Para la ejecución de esta prueba la velocidad se reguló en fracciones del PWM (Duty Cycle) enviado al servo, y se observó el comportamiento del sistema para cada velocidad seleccionada. Esta prueba se realizó a tres diferentes velocidades (baja, media y alta) seleccionándose la más adecuada.

5.1.3.2. Apertura y cierre del gripper

Se realizaron pruebas para determinar la velocidad de trabajo adecuada del servo del gripper para que el agarre y el emplazamiento de las piezas se realicen sin que estas sufran daño.

La velocidad se reguló en fracciones del PWM (Duty Cycle) enviado al servo, y se observó el comportamiento del gripper con cada velocidad seleccionada. Esta prueba se realizó a tres diferentes velocidades (baja, media y alta) seleccionándose la más adecuada.

5.1.3.3. Sistema de empuje

Se realizaron pruebas para determinar la velocidad de trabajo adecuada para el sistema de empuje y que la colocación de las piezas "A" sobre la banda se realice sin que estas sufran daño y en la posición correcta.

La velocidad se reguló en fracciones del PWM (Duty Cycle) enviado al servo, y se observó el comportamiento del sistema para

cada velocidad seleccionada. Esta prueba se realizó a tres diferentes velocidades (baja, media y alta) seleccionándose la más adecuada.

5.1.3.4. Sistema de elevación

Se realizaron pruebas para determinar la velocidad de trabajo adecuada para el sistema de elevación y que la disposición de las piezas “B” a ser tomadas por el brazo se realice sin que estas sufran daño y queden en la posición correcta.

La velocidad se reguló en fracciones del PWM (Duty Cycle) enviado al servo, y se observó el comportamiento del sistema para cada velocidad seleccionada. Esta prueba se realizó a tres diferentes velocidades (baja, media y alta) seleccionándose la más adecuada.

5.1.3.5. Movimiento de la banda transportadora

Se realizaron pruebas para determinar la velocidad de trabajo adecuada de la banda transportadora para que el desplazamiento de las piezas “A” se efectúe de una manera en la cual no existan paros bruscos en las diferentes etapas del proceso, los cuales puedan afectar la posición de la pieza en la banda.

La velocidad se reguló en fracciones del PWM (Duty Cycle) enviado al servo, y se observó el comportamiento del sistema para cada velocidad seleccionada. Esta prueba se realizó a tres diferentes velocidades (baja, media y alta) seleccionándose la más adecuada.

5.1.4. Detección de objetos con cámara PIXY

5.1.4.1. Detección de tamaño

Se realizaron pruebas para verificar la repetibilidad en la medición de las dimensiones recibidas por el módulo Arduino MEGA de la pieza detectada por la cámara PIXY, lo que permite diferenciar entre piezas correctas y defectuosas, las dimensiones entregadas por la cámara están en píxeles.

Con esta prueba se pretende tomar los valores máximos y mínimos que arrojó la cámara para una pieza correcta y defectuosa, y estos puedan ser programados en el firmware para la adecuada ejecución de la aplicación.

En esta prueba se tomaron 50 muestras para cada pieza (correcta y defectuosa).

5.2. Resultados

5.2.1. Precisión de los ángulos de las articulaciones del brazo robótico

5.2.1.1. Cintura

Tabla 16

Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo "0°".

PRUEBA	ANGULO: 0°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	0	0,5	0,5
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0,3	0,3
5	0	0	0
6	0	0,8	0,8
7	0	0	0

➔ CONTINÚA

c8	0	-0,4	0,4
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0,3	0,3
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	-0,1	0,1
15	0	0,2	0,2
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0,4	0,4
20	0	0,6	0,6
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	-0,4	0,4
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	-0,2	0,2
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0
32	0	0,3	0,3
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0,8	0,8
36	0	1	1
37	0	0	0
38	0	0	0
39	0	0	0
40	0	-0,5	0,5
41	0	0,2	0,2
42	0	0	0
43	0	0	0
44	0	0	0
45	0	0	0
46	0	0	0
47	0	0,7	0,7
48	0	0	0
49	0	0	0
50	0	0	0

→ CONTINÚA

PROMEDIO	0,09	0,154
-----------------	-------------	--------------

Tabla 17

Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo “90°”.

PRUEBA	ANGULO: 90°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	90	90,8	0,8
2	90	90,5	0,5
3	90	90	0
4	90	90	0
5	90	90	0
6	90	89,8	0,2
7	90	89,4	0,6
8	90	90,2	0,2
9	90	90	0
10	90	90	0
11	90	90	0
12	90	89,6	0,4
13	90	90	0
14	90	90	0
15	90	90,6	0,6
16	90	90	0
17	90	90,5	0,5
18	90	91	1
19	90	90	0
20	90	90	0
21	90	90	0
22	90	90	0
23	90	89	1
24	90	90	0
25	90	90	0
26	90	90	0
27	90	89,5	0,5
28	90	90	0
29	90	90	0
30	90	90	0
31	90	90,5	0,5
32	90	89,5	0,5
33	90	90	0
34	90	90	0
35	90	90	0

→ CONTINUÍA

36	90	90	0
37	90	91	1
38	90	90	0
39	90	90	0
40	90	90	0
41	90	90	0
42	90	90	0
43	90	89,2	0,8
44	90	90	0
45	90	90	0
46	90	90,2	0,2
47	90	90	0
48	90	90	0
49	90	89,8	0,2
50	90	90	0
PROMEDIO		90,022	0,19

Tabla 18

Datos obtenidos del servo de la cintura con ángulo “135°”.

PRUEBA	ANGULO: 135°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	135	135	0
2	135	135,5	0,5
3	135	135,2	0,2
4	135	135	0
5	135	135	0
6	135	135	0
7	135	135	0
8	135	135,1	0,1
9	135	135	0
10	135	135	0
11	135	134,6	0,4
12	135	135	0
13	135	136	1
14	135	135	0
15	135	135	0
16	135	135	0
17	135	135,5	0,5
18	135	134	1
19	135	135	0
20	135	135	0

→ CONTINÚA

21	135	135	0
22	135	135	0
23	135	135	0
24	135	136	1
25	135	135,5	0,5
26	135	135,7	0,7
27	135	135	0
28	135	135	0
29	135	135	0
30	135	135	0
31	135	135	0
32	135	134,8	0,2
33	135	134,5	0,5
34	135	135	0
35	135	135	0
36	135	135	0
37	135	136	1
38	135	135,8	0,8
39	135	135	0
40	135	135	0
41	135	135,5	0,5
42	135	134	1
43	135	135	0
44	135	135	0
45	135	134,5	0,5
46	135	135,5	0,5
47	135	135	0
48	135	135	0
49	135	135	0
50	135	135,5	0,5
PROMEDIO	135,084	0,228	

$$Error\ Absoluto\ CINTURA = \frac{0,154 + 0,19 + 0,228}{3}$$

$$Error\ Absoluto\ CINTURA = \pm 0,19^\circ$$

Se toma el resultado del error absoluto como aceptable para el sistema ya que cumple con la precisión necesaria para su aplicación específica.

5.2.1.2. Hombro

Tabla 19

Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo "15°".

PRUEBA	ÁNGULO: 15°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	15	15,4	0,4
2	15	15	0
3	15	15	0
4	15	15	0
5	15	15	0
6	15	15	0
7	15	15,5	0,5
8	15	14	1
9	15	14,6	0,4
10	15	15	0
11	15	15	0
12	15	15	0
13	15	14,3	0,7
14	15	14,5	0,5
15	15	15	0
16	15	15	0
17	15	15	0
18	15	15	0
19	15	15	0
20	15	15	0
21	15	15,5	0,5
22	15	16	1
23	15	15	0
24	15	15	0
25	15	15	0
26	15	14,5	0,5
27	15	15	0
28	15	14	1

→ CONTINÚA

29	15	15	0
30	15	15	0
31	15	15	0
32	15	15,5	0,5
33	15	15,2	0,2
34	15	15	0
35	15	15	0
36	15	15	0
37	15	15	0
38	15	14,5	0,5
39	15	15	0
40	15	15	0
41	15	15,5	0,5
42	15	16	1
43	15	15	0
44	15	15	0
45	15	15	0
46	15	15,5	0,5
47	15	14	1
48	15	15,8	0,8
49	15	15	0
50	15	15	0
PROMEDIO		15,006	0,23

Tabla 20

Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo "90°".

PRUEBA	ANGULO: 90°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	90	90,1	0,1
2	90	90,5	0,5
3	90	90	0
4	90	90	0
5	90	90	0
6	90	89,7	0,3
7	90	89,5	0,5
8	90	90	0
9	90	90	0
10	90	91	1
11	90	90	0

 **CONTINÚA**

12	90	89	1
13	90	90	0
14	90	90	0
15	90	90,7	0,7
16	90	90	0
17	90	90,5	0,5
18	90	90	0
19	90	90	0
20	90	90	0
21	90	90,5	0,5
22	90	90	0
23	90	89,4	0,6
24	90	90	0
25	90	90	0
26	90	90	0
27	90	90,5	0,5
28	90	90	0
29	90	90	0
30	90	89,5	0,5
31	90	90,5	0,5
32	90	89,4	0,6
33	90	90	0
34	90	90	0
35	90	90,5	0,5
36	90	90	0
37	90	89	1
38	90	90	0
39	90	90	0
40	90	90	0
41	90	90	0
42	90	90	0
43	90	89	1
44	90	90	0
45	90	90	0
46	90	90,2	0,2
47	90	90	0
48	90	90	0
49	90	90	0
50	90	89,7	0,3
PROMEDIO		89,984	0,216

Tabla 21

Datos obtenidos del servo del hombro con ángulo "115°".

PRUEBA	ANGULO: 115°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	115	115,2	0,2
2	115	115,5	0,5
3	115	115,4	0,4
4	115	115	0
5	115	115	0
6	115	115	0
7	115	115	0
8	115	115	0
9	115	115	0
10	115	115	0
11	115	114,5	0,5
12	115	115	0
13	115	116	1
14	115	115,5	0,5
15	115	115	0
16	115	115	0
17	115	114,7	0,3
18	115	114	1
19	115	115	0
20	115	115	0
21	115	115	0
22	115	115	0
23	115	115	0
24	115	116	1
25	115	115,8	0,8
26	115	115,5	0,5
27	115	115	0
28	115	115	0
29	115	115	0
30	115	115	0
31	115	115	0
32	115	114,5	0,5
33	115	114,7	0,3
34	115	115	0
35	115	115	0
36	115	115	0
37	115	116	1
38	115	115	0

→ CONTINÚA

39	115	115	0
40	115	115	0
41	115	115,5	0,5
42	115	115	0
43	115	115	0
44	115	115	0
45	115	115	0
46	115	115,2	0,2
47	115	115	0
48	115	115	0
49	115	115	0
50	115	114,6	0,4
PROMEDIO		115,072	0,192

$$Error\ Absoluto\ HOMBRO = \frac{0,23 + 0,216 + 0,192}{3}$$

$$Error\ Absoluto\ HOMBRO = \pm 0,21^\circ$$

Se toma el resultado del error absoluto como aceptable para el sistema ya que cumple con la precisión necesaria para su aplicación específica.

5.2.1.3. Codo

Tabla 22

Datos obtenidos del servo del codo con ángulo "0°".

PRUEBA	ÁNGULO: 0°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	-1	1
5	0	-0,6	0,6
6	0	0,5	0,5

→ CONTINÚA

7	0	0,7	0,7
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0,2	0,2
16	0	0,5	0,5
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	1	1
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	-0,4	0,4
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	-0,8	0,8
31	0	-0,5	0,5
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
38	0	0,7	0,7
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0,5	0,5
44	0	0,6	0,6
45	0	-0,3	0,3
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	1	1

 CONTINÚA

50	0	0	0
PROMEDIO		0,042	0,186

Tabla 23

Datos obtenidos del servo del codo con ángulo "90°".

PRUEBA	ANGULO: 90°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	90	90,6	0,6
2	90	91	1
3	90	90	0
4	90	90	0
5	90	90	0
6	90	89,7	0,3
7	90	89,9	0,1
8	90	90	0
9	90	90	0
10	90	91	1
11	90	90	0
12	90	89	1
13	90	90	0
14	90	90	0
15	90	90,5	0,5
16	90	90	0
17	90	90	0
18	90	90	0
19	90	90	0
20	90	90	0
21	90	90,5	0,5
22	90	90	0
23	90	89,5	0,5
24	90	90	0
25	90	90	0
26	90	90	0
27	90	90,6	0,6
28	90	90	0
29	90	90	0
30	90	90	0
31	90	90,5	0,5
32	90	89,3	0,7
33	90	90	0
34	90	90	0

→ CONTINÚA

35	90	90,5	0,5
36	90	90	0
37	90	89	1
38	90	90	0
39	90	90	0
40	90	90	0
41	90	90	0
42	90	90	0
43	90	89	1
44	90	90	0
45	90	90	0
46	90	90	0
47	90	90	0
48	90	90	0
49	90	90	0
50	90	89,2	0,8
PROMEDIO		89,996	0,212

Tabla 24

Datos obtenidos del servo del codo con ángulo “115°”.

PRUEBA	ANGULO: 115°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	115	114	1
2	115	115	0
3	115	115,5	0,5
4	115	115	0
5	115	115	0
6	115	115	0
7	115	115	0
8	115	115,3	0,3
9	115	115	0
10	115	115	0
11	115	114,4	0,6
12	115	115	0
13	115	116	1
14	115	115,7	0,7
15	115	115	0
16	115	115	0
17	115	115	0
18	115	114,1	0,9
19	115	115	0

→ CONTINÚA

20	115	115,5	0,5
21	115	115	0
22	115	115	0
23	115	115	0
24	115	116	1
25	115	115,5	0,5
26	115	114,5	0,5
27	115	115	0
28	115	115	0
29	115	115	0
30	115	115	0
31	115	115	0
32	115	114,5	0,5
33	115	114,5	0,5
34	115	115	0
35	115	115	0
36	115	115	0
37	115	114	1
38	115	115	0
39	115	115	0
40	115	115	0
41	115	115,1	0,1
42	115	115	0
43	115	115	0
44	115	115	0
45	115	115	0
46	115	115,5	0,5
47	115	115	0
48	115	115	0
49	115	115	0
50	115	115,3	0,3
PROMEDIO		115,008	0,208

$$Error\ Absoluto\ CODO = \frac{0,186 + 0,212 + 0,208}{3}$$

$$Error\ Absoluto\ CODO = \pm 0,20^\circ$$

Se toma el resultado del error absoluto como aceptable para el sistema ya que cumple con la precisión necesaria para su aplicación específica.

5.2.1.4. Muñeca

Tabla 25

Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo "0°".

PRUEBA	ANGULO: 0°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	0	0,1	0,1
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0,9	0,9
5	0	-0,5	0,5
6	0	0,6	0,6
7	0	0,3	0,3
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	-0,2	0,2
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0,7	0,7
16	0	0,4	0,4
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	1	1
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	-0,5	0,5
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0

→ CONTINÚA

30	0	-1	1
31	0	-0,5	0,5
32	0	0	0
33	0	0	0
34	0	0	0
35	0	0	0
36	0	0	0
37	0	0	0
38	0	0,5	0,5
39	0	0	0
40	0	0	0
41	0	0	0
42	0	0	0
43	0	0,2	0,2
44	0	0,5	0,5
45	0	-0,6	0,6
46	0	0	0
47	0	0	0
48	0	0	0
49	0	0,8	0,8
50	0	0	0
PROMEDIO		0,054	0,186

Tabla 26

Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo "45°".

PRUEBA	ANGULO: 45°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	45	45,3	0,3
2	45	45,1	0,1
3	45	45	0
4	45	45	0
5	45	45	0
6	45	44	1
7	45	45	0
8	45	45	0
9	45	45	0
10	45	45	0
11	45	45	0
12	45	44,8	0,2
13	45	45	0
14	45	45	0

→ CONTINÚA

15	45	45	0
16	45	45	0
17	45	45,6	0,6
18	45	45	0
19	45	45	0
20	45	45	0
21	45	45	0
22	45	45	0
23	45	45	0
24	45	45,5	0,5
25	45	45	0
26	45	45	0
27	45	45	0
28	45	44	1
29	45	45	0
30	45	45	0
31	45	46	1
32	45	46,4	1,4
33	45	45	0
34	45	45	0
35	45	45	0
36	45	45	0
37	45	45	0
38	45	45	0
39	45	45	0
40	45	45	0
41	45	44,8	0,2
42	45	45	0
43	45	45	0
44	45	45	0
45	45	45,1	0,1
46	45	45	0
47	45	45	0
48	45	45	0
49	45	45,2	0,2
50	45	45	0
PROMEDIO		45,036	0,132

Tabla 27

Datos obtenidos del servo de la muñeca con ángulo "90°".

PRUEBA	ANGULO: 90°		ERROR ABSOLUTO [°]
	HMI	SERVO	
1	90	90,3	0,3
2	90	90,6	0,6
3	90	90	0
4	90	90	0
5	90	90	0
6	90	90	0
7	90	89,7	0,3
8	90	90	0
9	90	90	0
10	90	89,5	0,5
11	90	90	0
12	90	89	1
13	90	90	0
14	90	90	0
15	90	90,2	0,2
16	90	90	0
17	90	90	0
18	90	90	0
19	90	90	0
20	90	90	0
21	90	90,1	0,1
22	90	90	0
23	90	89,3	0,7
24	90	90	0
25	90	90	0
26	90	90	0
27	90	90,1	0,1
28	90	90	0
29	90	90	0
30	90	90	0
31	90	90,7	0,7
32	90	90	0
33	90	90	0
34	90	90	0
35	90	90,5	0,5
36	90	90	0
37	90	89	1
38	90	90	0

→ CONTINÚA

39	90	90	0
40	90	90	0
41	90	90	0
42	90	90	0
43	90	89	1
44	90	90	0
45	90	90	0
46	90	90	0
47	90	90	0
48	90	90	0
49	90	90	0
50	90	90,1	0,1
PROMEDIO		89,962	0,142

$$Error\ Absoluto_{MUÑECA} = \frac{0,186 + 0,132 + 0,142}{3}$$

$$Error\ Absoluto_{MUÑECA} = \pm 0,15^\circ$$

Se toma el resultado del error absoluto como aceptable para el sistema ya que cumple con la precisión necesaria para su aplicación específica.

5.2.2. Precisión de las coordenadas XYZ del TCP del brazo robótico

Tabla 28

Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (12,15, 8).

PRUEBA	HMI			TCP			ERROR ABSOLUTO		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	12	15	8	12	15	7,8	0	0	0,2
2	12	15	8	12,1	15	8	0,1	0	0
3	12	15	8	12	15	8	0	0	0
4	12	15	8	12	15	8	0	0	0

➔ CONTINÚA

5	12	15	8	12	15	8	0	0	0
6	12	15	8	11,8	15	8,1	0,2	0	0,1
7	12	15	8	12	15,3	8	0	0,3	0
8	12	15	8	12	15	8	0	0	0
9	12	15	8	12	15	8	0	0	0
10	12	15	8	12	15,1	8	0	0,1	0
11	12	15	8	12	14,8	8	0	0,2	0
12	12	15	8	12	15	8	0	0	0
13	12	15	8	12	15	8,5	0	0	0,5
14	12	15	8	12	15	8	0	0	0
15	12	15	8	12	15	8	0	0	0
16	12	15	8	12	15	8	0	0	0
17	12	15	8	12,3	15	8,2	0,3	0	0,2
18	12	15	8	12	15	8	0	0	0
19	12	15	8	12	15,5	8	0	0,5	0
20	12	15	8	12	15	8	0	0	0
21	12	15	8	12	15	8	0	0	0
22	12	15	8	12	15	8	0	0	0
23	12	15	8	12	14,8	8	0	0,2	0
24	12	15	8	12	15	7,7	0	0	0,3
25	12	15	8	11,7	15	8	0,3	0	0
26	12	15	8	12	15	8	0	0	0
27	12	15	8	12	15	8,1	0	0	0,1
28	12	15	8	12	15	8	0	0	0
29	12	15	8	11,5	15,2	8	0,5	0,2	0
30	12	15	8	12	15	8	0	0	0
31	12	15	8	12	15	8	0	0	0
32	12	15	8	12	15	8	0	0	0
33	12	15	8	12	15	8	0	0	0
34	12	15	8	12	15	8	0	0	0
35	12	15	8	12	15	8	0	0	0
36	12	15	8	12	15	8,2	0	0	0,2
37	12	15	8	12	15	8	0	0	0
38	12	15	8	12,5	15	8	0,5	0	0
39	12	15	8	12	15	8	0	0	0
40	12	15	8	12	15,3	8	0	0,3	0
41	12	15	8	12	15	8	0	0	0
42	12	15	8	12	15	8	0	0	0
43	12	15	8	12	15	8,1	0	0	0,1
44	12	15	8	12,1	15	8	0,1	0	0
45	12	15	8	12	15	8	0	0	0
46	12	15	8	12	15	8	0	0	0
47	12	15	8	12	15	8	0	0	0

➔ CONTINÚA

48	12	15	8	12	14,8	8	0	0,2	0
49	12	15	8	12	15	8	0	0	0
50	12	15	8	12,2	15	8	0,2	0	0
PROMEDIO				12,004	15,016	8,014	0,044	0,04	0,034

Tabla 29

Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (10, 0,15).

PRUEBA	HMI			TCP			ERROR ABSOLUTO		
	X	Y	Z	X	0	Z	X	Y	Z
1	10	0	15	10	0	15,2	0	0	0,2
2	10	0	15	10,2	0	15	0,2	0	0
3	10	0	15	10	0	15	0	0	0
4	10	0	15	10	0	15	0	0	0
5	10	0	15	10	0	15	0	0	0
6	10	0	15	10	0	15	0	0	0
7	10	0	15	10,4	0	15	0,4	0	0
8	10	0	15	10	0	15,4	0	0	0,4
9	10	0	15	10	0	15	0	0	0
10	10	0	15	10	0	15	0	0	0
11	10	0	15	10	0	15	0	0	0
12	10	0	15	9,8	0	15	0,2	0	0
13	10	0	15	10	-0,1	15	0	0,1	0
14	10	0	15	10	0	15	0	0	0
15	10	0	15	10	0	15	0	0	0
16	10	0	15	10	0	14,7	0	0	0,3
17	10	0	15	10	0	15	0	0	0
18	10	0	15	10	0	15	0	0	0
19	10	0	15	10	0	15	0	0	0
20	10	0	15	10,2	0	15	0,2	0	0
21	10	0	15	10	0	15	0	0	0
22	10	0	15	10	0	15	0	0	0
23	10	0	15	10	0,4	15	0	0,4	0
24	10	0	15	10	0	15	0	0	0
25	10	0	15	10,4	0	15	0,4	0	0
26	10	0	15	10	0	15,5	0	0	0,5
27	10	0	15	10	0	15	0	0	0
28	10	0	15	10	0	15	0	0	0
29	10	0	15	10	0,2	15	0	0,2	0
30	10	0	15	10	0	15	0	0	0
31	10	0	15	10,3	0	14,6	0,3	0	0,4
32	10	0	15	9,7	0	14,9	0,3	0	0,1

→ CONTINÚA

33	10	0	15	10	0	15	0	0	0
34	10	0	15	10	0	15	0	0	0
35	10	0	15	10	-0,4	15	0	0,4	0
36	10	0	15	10	0	15	0	0	0
37	10	0	15	10	0	15	0	0	0
38	10	0	15	10	0	15,1	0	0	0,1
39	10	0	15	10	0	15	0	0	0
40	10	0	15	10	0	15	0	0	0
41	10	0	15	10,3	0	15	0,3	0	0
42	10	0	15	10	0,1	15	0	0,1	0
43	10	0	15	10	0	15	0	0	0
44	10	0	15	10	0	15	0	0	0
45	10	0	15	10	0	15	0	0	0
46	10	0	15	10	0	15	0	0	0
47	10	0	15	10	0	15,3	0	0	0,3
48	10	0	15	9,8	0	15	0,2	0	0
49	10	0	15	10	0	15	0	0	0
50	10	0	15	10	0,3	15	0	0,3	0
PROMEDIO				10,022	0,01	15,014	0,05	0,03	0,046

Tabla 30

Datos obtenidos del TCP del robot en las coordenadas (-18,11, 20).

PRUEBA	HMI			TCP			ERROR ABSOLUTO		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-18	11	20	-18,2	11	20,2	0,2	0	0,2
2	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
3	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
4	-18	11	20	-18	11	19,8	0	0	0,2
5	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
6	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
7	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
8	-18	11	20	-18	10,8	20	0	0,2	0
9	-18	11	20	-17,8	11	20	0,2	0	0
10	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
11	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
12	-18	11	20	-18	10,7	20	0	0,3	0
13	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
14	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
15	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
16	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
17	-18	11	20	-18	11	20,5	0	0	0,5

→ CONTINÚA

18	-18	11	20	-18,4	11,5	20	0,4	0,5	0
19	-18	11	20	-18,2	11	20	0,2	0	0
20	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
21	-18	11	20	-18	11	20,1	0	0	0,1
22	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
23	-18	11	20	-18	11,2	20	0	0,2	0
24	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
25	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
26	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
27	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
28	-18	11	20	-17,6	11	19,6	0,4	0	0,4
29	-18	11	20	-18	11,2	19,8	0	0,2	0,2
30	-18	11	20	-18	10,8	20	0	0,2	0
31	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
32	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
33	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
34	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
35	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
36	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
37	-18	11	20	-18	10,7	20	0	0,3	0
38	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
39	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
40	-18	11	20	-18	11	19,8	0	0	0,2
41	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
42	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
43	-18	11	20	-18,3	11,3	20	0,3	0,3	0
44	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
45	-18	11	20	-18	11	20,4	0	0	0,4
46	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
47	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
48	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
49	-18	11	20	-18	11	20	0	0	0
50	-18	11	20	-18,1	11	20	0,1	0	0
PROMEDIO				-18,01	11,004	20,004	0,036	0,044	0,044

$$Error\ Absoluto\ x = \frac{0,044 + 0,05 + 0,036}{3}$$

$$Error\ Absoluto\ x = 0,04\ cm$$

$$\text{Error Absoluto}_Y = \frac{0,04 + 0,03 + 0,044}{3}$$

$$\text{Error Absoluto}_Y = 0,038 \text{ cm}$$

$$\text{Error Absoluto}_Z = \frac{0,034 + 0,046 + 0,044}{3}$$

$$\text{Error Absoluto}_Z = 0,041 \text{ cm}$$

Se toma los resultados de los errores absolutos de X, Y, Z, respectivamente como aceptables para el sistema ya que cumple con la precisión necesaria para su aplicación específica.

5.2.3. Velocidad de trabajo

Para la selección de la velocidad de trabajo de cada servomotor utilizado en este proyecto se realizan tablas de ponderaciones en un rango de 1 a 5, asignándole 5 a la característica que más cumpla con las condiciones de su aplicación.

5.2.3.1. Velocidad de movimiento de las articulaciones del brazo

Tabla 31

Selección de la velocidad de trabajo del brazo.

DUTY CICLE	CARACTERÍSTICAS			
	Velocidad de trabajo adecuada	Integridad del brazo	Integridad del operador	Integridad de objetos que interactúan
20%	5	5	5	5
50%	3	5	4	3
100%	1	3	2	2

Se seleccionó un Duty Cycle del 20% por ser la más adecuada para su correcto funcionamiento.

5.2.3.2. Velocidad de activación y desactivación del gripper

Tabla 32

Selección de la velocidad de trabajo del gripper.

DUTY CYCLE	CARACTERÍSTICAS		
	Velocidad de trabajo adecuada	Integridad del gripper	Integridad de objetos que interactúan
20%	3	5	5
50%	5	5	5
100%	1	3	2

Se seleccionó un Duty Cycle del 50% por ser la más adecuada para su correcto funcionamiento.

5.2.3.3. Sistema de empuje

Tabla 33

Selección de la velocidad de trabajo del sistema de empuje

DUTY CYCLE	CARACTERÍSTICAS			
	Velocidad de trabajo adecuada	Integridad del sistema	Posicionamiento del objeto en la banda	Integridad de objetos que interactúan
20%	3	5	4	5
50%	5	5	5	5
100%	1	3	2	2

Se seleccionó un Duty Cycle del 50% por ser la más adecuada para su correcto funcionamiento.

5.2.3.4. Sistema de elevación

Tabla 34

Selección de la velocidad de trabajo del sistema de elevación

DUTY CICLE	CARACTERÍSTICAS			
	Velocidad de trabajo adecuada	Integridad del sistema	Posicionamiento del objeto para su agarre	Integridad de objetos que interactúan
20%	5	5	5	5
50%	3	5	4	5
100%	1	3	2	3

Se seleccionó un Duty Cycle del 20% por ser la más adecuada para su correcto funcionamiento

5.2.3.5. Banda

Tabla 35

Selección de la velocidad de trabajo de la banda

DUTY CICLE	CARACTERÍSTICAS		
	Velocidad de trabajo adecuada	Integridad del sistema	Integridad de objetos que interactúan
30%	5	5	5
60%	3	4	3
100%	1	2	2

Se seleccionó un Duty Cycle del 30% por ser la más adecuada para su correcto funcionamiento

5.2.4. Detección de objetos con cámara PIXY

5.2.4.1. Detección de tamaño

Tabla 36

Datos de dimensiones de piezas correctas con la PIXY.

PRUEBA	Altura	Ancho
1	173	153
2	171	153
3	173	153
4	174	155
5	173	155
6	174	157
7	174	153
8	174	154
9	173	154
10	173	155
11	174	155
12	173	157
13	173	154
14	174	159
15	173	157
16	174	154
17	173	155
18	174	156
19	172	157
20	174	157
21	173	147
22	174	154
23	172	153
24	173	154
25	174	155
26	173	155
27	171	156
28	173	154
29	174	157
30	173	153
31	174	154
32	174	158
33	174	155
34	173	155

→ CONTINÚA

35	173	157
36	174	153
37	173	156
38	174	153
39	172	155
40	174	154
41	173	155
42	174	156
43	172	153
44	173	155
45	174	156
46	173	154
47	171	157
48	173	153
49	174	154
50	173	158
Mínimo	171	147
Máximo	174	159

Tabla 37

Datos de dimensiones de piezas defectuosas con la PIXY.

PRUEBA	Altura	Ancho
1	133	155
2	131	157
3	133	154
4	134	159
5	133	157
6	135	154
7	134	155
8	134	156
9	133	157
10	133	154
11	134	153
12	133	153
13	133	153
14	134	155
15	134	155
16	134	157
17	135	153
18	134	154
19	132	154

→ **CONTINÚA**

20	134	155
21	133	147
22	134	154
23	132	153
24	133	154
25	134	155
26	133	155
27	131	156
28	133	156
29	134	153
30	133	155
31	134	154
32	134	155
33	134	156
34	133	153
35	133	155
36	134	156
37	133	154
38	134	157
39	132	153
40	134	154
41	133	158
42	134	155
43	132	155
44	133	157
45	134	153
46	133	154
47	131	157
48	135	153
49	134	154
50	133	158
Mínimo	131	147
Máximo	135	158

Para las piezas correctas se tomó el rango de medidas desde 171 hasta 174 para la altura y de 147 a 159 para el ancho; y para las piezas defectuosas el rango desde 131 hasta 135 para la altura y de 147 a 158 para el ancho. Con lo que se asegura la precisa detección de las piezas.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS

6.1. Costos de materiales

En esta sección se detallan los costos de los diferentes materiales empleados en la elaboración del presente proyecto, los cuales se dividen en costos de material mecánico y estructural, costos de material de hardware electrónico.

6.1.1. Materiales mecánicos

En la siguiente tabla se detallan los costos y cantidades de los materiales utilizados para la construcción del sistema del presente proyecto.

Tabla 38

Costo de materiales mecánicos.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
1/4 de plancha acrílico transparente 6 líneas	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Lamina tamaño A4 de acrílico transparente 4 líneas	1	\$ 3,50	\$ 3,50
Lamina tamaño A5 de acrílico transparente 3 líneas	1	\$ 2,00	\$ 2,00
Lamina tamaño A4 de acrílico transparente 12 líneas	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Tabla triplex 30x60 de 4mm	1	\$ 3,00	\$ 3,00
Pinturas en spray	4	\$ 2,65	\$ 10,60
Ángulos metálicos	1	\$ 1,70	\$ 1,70
Lijas	2	\$ 0,35	\$ 0,70
Hilo nylon	1	\$ 0,70	\$ 0,70
Resbalón adhesivo transparente	1	\$ 1,15	\$ 1,15
Varilla roscada 5/16"	1	\$ 2,50	\$ 2,50

➔ **CONTINÚA**

Tuercas 5/16"	14	\$ 0,10	\$ 1,40
Cinta de nylon (cinturón de seguridad) x metro	1	\$ 12,00	\$ 12,00
Tornillos M3 x 10mm con tuerca	40	\$ 0,02	\$ 0,80
Tornillos M3 x 15mm con tuerca	100	\$ 0,04	\$ 4,00
Tornillos M2 x 10mm con tuerca	20	\$ 0,02	\$ 0,40
Tornillos M2 x 15mm con tuerca	40	\$ 0,03	\$ 1,20
Tornillos M3 x 25mm con tuerca	10	\$ 0,10	\$ 1,00
Tornillos M3 x 30mm con tuerca	1	\$ 0,12	\$ 0,12
Tornillos M2 x 25mm con tuerca	8	\$ 0,05	\$ 0,40
Tubo de llanta de bicicleta	1	\$ 10,00	\$ 10,00
Tornillos M3 x 6mm autoroscantes	16	\$ 0,01	\$ 0,16
TOTAL			\$ 102,33

6.1.2. Materiales electrónicos

En la siguiente tabla se detallan los costos y cantidades de los materiales utilizados para la elaboración del hardware electrónico del sistema del presente proyecto.

Tabla 39

Costo de materiales electrónicos.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Placa fibra de vidrio para circuitos tamaño A4	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Ácido	1	\$ 1,00	\$ 1,00
Resistencias 1k de 1/4w	10	\$ 0,02	\$ 0,20
Resistencias 220 de 1/4w	10	\$ 0,02	\$ 0,20
Resistencias 10k de 1/4w	6	\$ 0,02	\$ 0,12
Resistencias 680 de 1/4w	3	\$ 0,02	\$ 0,06
Resistencias 2,2k de 1/4w	6	\$ 0,02	\$ 0,12
Sensores QRD-1114	6	\$ 1,85	\$ 11,10
Integrado LS7414	1	\$ 0,85	\$ 0,85
Sócalo 14 pines	1	\$ 0,15	\$ 0,15
Espadines macho simples	3	\$ 0,60	\$ 1,80
Espadines macho dobles	1	\$ 0,80	\$ 0,80
Espadines macho en L	2	\$ 0,90	\$ 1,80
Regleta hembra simple	4	\$ 0,58	\$ 2,32

➔ **CONTINÚA**

Pulsadores	10	\$ 0,35	\$ 3,50
Diodo 1N4007	1	\$ 0,10	\$ 0,10
Relé doble 12V	1	\$ 0,70	\$ 0,70
Buzzer	1	\$ 0,90	\$ 0,90
Cable tipo bus x unidad	3	\$ 3,00	\$ 9,00
Termo contraíble x metro	3	\$ 0,40	\$ 1,20
Conectores de 2 pines	10	\$ 0,30	\$ 3,00
Conectores de 4 pines	1	\$ 0,55	\$ 0,55
Pulsador de enclavamiento	1	\$ 0,35	\$ 0,35
Switch de llave	1	\$ 1,80	\$ 1,80
Cable de hilos #18 x metro	3	\$ 0,50	\$ 1,50
Plug DC	2	\$ 0,50	\$ 1,00
Leds	5	\$ 0,25	\$ 1,25
Servo MG995	1	\$ 18,00	\$ 18,00
Servo SG90	3	\$ 9,50	\$ 28,50
Cámara IP	1	\$ 75,00	\$ 75,00
TOTAL			\$ 181,87

6.2. Costos de diseño

En esta sección se detallan los costos de diseño de los diversos elementos que conforman el presente proyecto, los cuales se dividen en diseño mecánico, diseño geométrico, diseño electrónico, desarrollo de software.

6.2.1. Diseño mecánico

Los costos del diseño mecánico del presente proyecto, el cual se compone de la estructura de los dispensadores, soporte banda transportadora, banda transportadora y sistemas de empuje y elevación, tomando en cuenta los cálculos y análisis respectivos realizados a los mismos, además del diseño geométrico de la base del módulo de aplicación, las piezas "A" y "B" y cajas de los circuitos ascienden a un valor de 200 dólares USA.

6.2.2. Diseño electrónico

Los costos del diseño electrónico de las diferentes placas necesarias para cada etapa del sistema, tomando en cuenta los cálculos, diseño de circuitos y ruteo de PCB, ascienden a un valor de 150 dólares USA.

6.2.3. Desarrollo de software

Los costos del desarrollo de software para el funcionamiento del presente proyecto, el cual se compone del firmware de control, el software de control y HMI web, tomando en cuenta la complejidad y tiempo requerido para cada uno de los diferentes lenguajes de programación, ascienden a un valor de 350 dólares USA.

6.3. Costos de implementación

En esta sección se detallan los costos de implementación de la parte mecánica, hardware electrónico y software del presente proyecto.

Tabla 40

Costos de implementación.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Corte laser de las piezas de acrílico	\$ 110,00
Construcción del módulo de aplicación	\$ 50,00
Construcción de hardware electrónico	\$ 50,00
TOTAL	\$ 210,00

6.4. Costo total

En esta sección se presenta el costo acumulado de materiales, diseño e implementación de presente proyecto el cual asciende a un total de 1194,20 dólares USA como se puede apreciar en la *Tabla 28*.

Tabla 41

Costo total del proyecto.

DESCRIPCIÓN	COSTO
Materiales	
Mecánicos	\$ 102,33
Electrónicos	\$ 181,87
Diseño	
Mecánico y geométrico	\$ 200,00
Electrónico	\$ 150,00
Software	\$ 350,00
Implementación	\$ 210,00
TOTAL	\$ 1.194,20

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un controlador con conectividad web para el manipulador robótico utilizando una tarjeta microcontrolada y un módulo ETHERNET.
- Se diseñó e implementó la circuitería de acoplamiento entre el controlador y los sensores y actuadores del sistema incluyendo elementos de seguridad.
- Se diseñó un software de control y entorno HMI para el control del manipulador y ejecución de la aplicación el cual sea accesible a través de la red LAN de la empresa.
- Se diseñó e implementó una aplicación demostrativa para el manipulador robótico la cual consista en un proceso de clasificación, ensamble y paletización utilizando visión artificial.”
- Se diseñó y fabricó los objetos y mecanismos que intervendrán en el proceso de la aplicación a ser diseñada.”
- Entre los métodos utilizados para la obtención de la cinemática inversa, el método geométrico es el más fácil de implementar en lenguajes de programación convencionales, ya que no necesita de cálculos complejos como por ejemplo el sistema de ecuaciones que genera el método Denavit Hartenberg.
- La inspección de piezas por medio de visión artificial es una excelente práctica para la clasificación y control de calidad de éstas lo que permite mejorar la precisión del sistema en procesos productivos.
- A pesar de las variadas capacidades de la PIXY CMUcam sus prestaciones son limitadas ya que está diseñada para aplicaciones

muy específicas, como es la detección y rastreo de objetos por su color.

- Durante el desarrollo de este proyecto se logró comprender de una mejor manera la cinemática de un brazo robótico antropomórfico y su implementación dentro de la programación de su controlador.
- La precisión en los movimientos del brazo robótico se puede ver afectada por la calidad de los servomotores utilizados en sus articulaciones.
- El control de la velocidad de los motores utilizados para el desarrollo de este proyecto es fundamental debido a que de esta manera se determina para cada motor la velocidad de trabajo adecuada y segura de acuerdo a su aplicación.
- Los resultados de los cálculos para la banda transportadora se pueden apreciar como sobredimensionados en algunos aspectos, esto se debe a que por su tamaño y aplicación ésta no va a estar sometida a tensiones y cargas de una banda en una aplicación real.
- Realizar la HMI dentro de una página web facilita el acceso de los usuarios desde cualquier computador conectado a la red de la empresa.
- El mecanismo de retorno rápido el cual fue seleccionado para el sistema de empuje brinda un extenso recorrido lo que permite colocar la pieza de una manera correcta sobre la banda transportadora.
- El sistema de elevación basado en un sistema de poleas no exige excesivo torque a su motor al momento del ascenso de las piezas.
- Resulta de gran importancia obtener el espacio de trabajo del brazo robótico para poder determinar en qué tipo de aplicaciones resulta útil, además de evitar zonas de poco alcance.
- Una aplicación práctica permite demostrar las capacidades del brazo robótico.

7.2. Recomendaciones

- De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda a la empresa el reemplazo de los servomotores de las articulaciones del manipulador robótico.
- Se recomienda diseñar e implementar otros ejemplos de aplicación para el manipulador para poder apreciar mejor su flexibilidad.
- Se recomienda a la empresa incluir personal con conocimientos de robótica en el departamento de Investigación y Desarrollo para que puedan continuar desarrollando avances en el prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

Banzi, M. (2012). *Introducción a Arduino*. España: Grupo Anaya Comercial.

Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de Robotica*. España: S.A. MCGRAW-HILL.

Bolton, W. (2010). *Mecatronica, Sistemas de control electronico en la ingeniería mecanica y electrica*. Mexico D.F.-Mexico: Alfaomega.

Boylestad, R. (Mexico). *Fundamentos de Electronica*. 1996: Pearson.

Budynas, R. G. (2012). *Diseño en ingeniería mecanica*. Mexico: S.A. MCGRAW-HILL.

Cleghorn, W. (2015). *Mechanics of Machines*. Canada: Oxford University Press.

Gauchat, J. D. (2012). *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. España: Marcombo.

Salinero, M. (2013). *Diseño de una banda transportadora mediante GUIDE Matlab*. Madrid-España: Universidad Carlos III de Madrid.

Sklar, D. (2005). *Introducción a PHP 5*. España: Anaya Multimedia.

Stallings, W. (2004). *Comunicaciones y redes de computadores*. Mexico: Pearson.

Torrente, O. (2013). *Arduino, Curso practico de formación*. Madrid-España: RC Libros.

Ulrich, K. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos*. Mexico D.F.-Mexico: MCGRAW-HILL.

ARDUINO AG, (2015.). *Arduino Tutorials*. Revisado 2016/2017, de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>

Lang, J.-P. (2011). *CMUcam5 Pixy - CMUcam: Open Source Programmable Embedded Color Vision Sensors*. Revisado 2016/2017, de CMUcam5 Pixy Wiki: <http://cmucam.org/projects/cmucam5/wiki>

ANEXOS