



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
OMNIDIRECCIONAL DE TRANSPORTE PARA LA CLASIFICACIÓN Y
CONTROL DE CALIDAD USANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL
LABORATORIO DE MECATRÓNICA.

AUTORES:

BARRIONUEVO SALAZAR, ERICK SANTIAGO
NAVAS ESCUDERO, BRYAN ALBERTO

DIRECTOR:

ING. REA MINANGO, SYLVIA NATHALY

LATACUNGA

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA OMNIDIRECCIONAL DE TRANSPORTE PARA LA CLASIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD USANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**” realizado por los señores **Barrionuevo Salazar, Erick Santiago y Navas Escudero, Bryan Alberto**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **Erick Santiago Barrionuevo Salazar y Bryan Alberto Navas Escudero** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, julio del 2018

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Nathaly Rea', is written over a horizontal line.

Ing. Nathaly Rea

C.C.: 1721261921



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Barrionuevo Salazar, Erick Santiago** con cédula de identidad N° **1804615373** y **Navas Escudero, Bryan Alberto** con cédula de identidad N° **1804616330**, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA OMNIDIRECCIONAL DE TRANSPORTE PARA LA CLASIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD USANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Latacunga, julio del 2018

Erick Barrionuevo Salazar

C.C.: 1804615373

Bryan Navas Escudero

C.C.: 1804616330



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Barrionuevo Salazar, Erick Santiago y Navas Escudero, Bryan Alberto** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA OMNIDIRECCIONAL DE TRANSPORTE PARA LA CLASIFICACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD USANDO VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, julio del 2018

A blue ink signature of Erick Barrionuevo Salazar, consisting of a large, stylized initial 'E' followed by a cursive name.

Erick Barrionuevo Salazar

C.C.: 1804615373

A blue ink signature of Bryan Navas Escudero, consisting of a stylized initial 'B' followed by a cursive name.

Bryan Navas Escudero

C.C.: 1804616330

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a mis padres, Santiago y Myriam, quienes siempre con su apoyo incondicional han estado presentes en cada momento de mi vida, ayudándome a superar cada uno de los obstáculos que se han presentado, solo quiero decir que los quiero mucho. A mi hermano, Michael, que siempre ha estado junto a mí dándome apoyo y aliento para seguir adelante. A mi abuelita, Natividad, que con su cariño y buenos consejos siempre ha estado presente en los momentos que más lo necesitaba. A mi esposa Carolina que siempre ha estado junto a mí, siendo mi mano derecha, amiga y compañera que me ayudó a culminar este sueño. A mis amigos, que con apoyo mutuo logramos superar cada obstáculo que se presentaba a lo largo de nuestra carrera.

Erick

Dedico este proyecto de grado a mis padres, José y Lorena, quienes con su cariño y consejos siempre han sido mi pilar y apoyo, por no dejarme decaer y darme el aliento que necesitaba a diario, por comprender cuando tenía que ausentarme lo que me ha permitido culminar mi carrera universitaria. A mi hermano, Josué, que siempre ha estado conmigo alentándome a seguir adelante. A mi abuelita, Lolita, que con su afecto y cariño me ha ayudado a sentirme bien cada día. A mis amigos que desde el inicio de la carrera siempre nos hemos apoyado, lo que ha ayudado a fortalecer esa amistad y finalizar la carrera con éxito.

Bryan

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres por su apoyo incondicional durante la elaboración de este proyecto y todo el transcurso de la carrera universitaria, ya que con sus buenos consejos y apoyo logramos hacer realidad este sueño.

A nuestra tutora, Ing. Nathaly Rea por ser una guía y colaboradora incondicional durante cada una de las etapas que integran este trabajo.

A nuestros amigos por su amistad sincera y apoyo mutuo, que siempre existió, y nos acompañaron desde el inicio hasta el final esta carrera universitaria.

A cada una de las personas que directa o indirectamente nos ayudaron a culminar con éxito este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS**CARÁTULA**

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx

CAPÍTULO I**GENERALIDADES**

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Descripción resumida del proyecto	4
1.4. Justificación e importancia.....	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo General.....	7
1.5.2. Objetivos Específicos	7
1.6. Hipótesis.....	8

CAPÍTULO II**FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN**

2.1. Sistemas de Transporte en la Industria.....	9
--	---

2.1.1.	Bandas Transportadoras	9
2.1.2.	Tipos de bandas transportadoras	11
2.1.3.	Sistemas de transporte omnidireccionales.....	13
2.1.4.	Tipos de ruedas para el transporte	15
2.2.	Motores DC	16
2.2.1.	Motores paso a paso	17
2.3.	Tarjeta Arduino	18
2.4.	Piezas de prototipado rápido	19
2.5.	Criterios de clasificación y control de calidad	20
2.5.1.	Desplazamiento de Capas.....	22
2.5.2.	Deformación en las Capas.....	23
2.5.3.	Warping	23
2.5.4.	Pérdida completa de forma y acumulación de material:.....	24
2.6.	Dispositivos para la adquisición de imágenes.....	26
2.6.1.	Cámara web	26
2.6.2.	Cámara estereoscópica	27
2.7.	Procesamiento digital de imágenes	28
2.7.1.	Introducción.....	28
2.7.2.	Operaciones con imágenes	29
2.8.	OpenCV.....	34
2.9.	Redes neuronales.....	34
2.9.1.	Neurona artificial.....	34
2.9.2.	Redes Neuronales Artificiales (ANN)	35
2.9.3.	Aprendizaje Adaptativo.....	36
2.9.4.	Componentes de una Red Neuronal Artificial (ANN).....	37

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1.	Diseño del mecanismo omnidireccional	38
3.1.1.	Selección del tipo de ruedas a emplearse	38
3.1.2.	Selección de las ruedas omnidireccionales a utilizarse	41
3.1.3.	Diseño del eje de las ruedas omnidireccionales de 48 mm	43
3.1.4.	Diseño del eje de las ruedas omnidireccionales de 125 mm	49
3.1.5.	Diseño del eje de la banda transportadora	54
3.1.6.	Selección de los motores	58
3.1.7.	Diseño del soporte del motor NEMA 23 de 9 kg.cm	61
3.1.8.	Diseño de los sistemas de transmisión	65
3.1.9.	Selección de las poleas del sistema de transmisión	65
3.1.10.	Diseño del soporte de la cámara	70
3.2.	Construcción del mecanismo omnidireccional	72
3.3.	Diseño del circuito electrónico	78
3.3.1.	Selección de los drivers	78
3.3.2.	Selección de la tarjeta de control	80
3.3.3.	Selección de la fuente de alimentación	81
3.4.	Construcción del circuito electrónico	82
3.5.	Selección e instalación de la cámara	86

CAPÍTULO IV

SOFTWARE DEL SISTEMA

4.1.	Descripción general	88
4.2.	Adquisición de imágenes	89

	x
4.3. Redes Neuronales Artificiales	92
4.3.1. Pre-entrenamiento	92
4.3.2. Aprendizaje.....	94
4.3.3. Clasificación	96
4.4. Programación en Arduino	98
4.5. Interfaz gráfica (GUI)	100
4.5.1. Creación de la GUI	101
4.5.2. Funcionamiento general de la GUI	105

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Entrenamiento de la red neuronal.....	109
5.2. Reconocimiento de imágenes.....	111
5.2.1. Prueba ambiente 1: Sistema con poca iluminación.....	111
5.2.2. Prueba ambiente 2: Sistema con iluminación natural.....	112
5.2.3. Prueba ambiente 3: Sistema completamente iluminado	113
5.2.4. Selección del Ambiente de Trabajo	113
5.3. Clasificación de piezas	114
5.3.1. Pruebas con diferentes tamaños de piezas	119
5.4. Pruebas de movimiento de motores	120
5.5. Pruebas generales de funcionamiento.....	125
5.5.1. Pruebas con la combinación 1	128
5.5.2. Pruebas con la combinación 2.....	132
5.5.3. Pruebas con la combinación 3.....	134
5.6. Comparación con otros sistemas.....	136

	xi
5.7. Validación de la hipótesis	138
5.8. Análisis económico del proyecto.....	142

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.....	145
6.2. Recomendaciones.....	146

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

149

ANEXOS.....

153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de visión y procesos del PDI	28
Tabla 2 Comparación de ruedas para transporte	39
Tabla 3 Ruedas omnidireccionales utilizadas.....	43
Tabla 4 Datos para calcular kt en el eje de las ruedas rojas	48
Tabla 5 Datos para calcular kt en el eje de las ruedas negras	52
Tabla 6 Datos para calcular kt en el eje de la banda transportadora	57
Tabla 7 Pesos de ejes con ruedas	59
Tabla 8 Informe de deformaciones unitarias	64
Tabla 9 Regiones de interés sobre el pallet	71
Tabla 10 Motores del mecanismo omnidireccional.....	78
Tabla 11 Drivers para los motores a pasos.....	79
Tabla 12 Comparación de los drivers	80
Tabla 13 Características técnicas de la fuente de alimentación	82
Tabla 14 Características técnicas de la cámara web.....	87
Tabla 15 Carpetas para el entrenamiento de la red	92
Tabla 16 Arquitectura de la red	94
Tabla 17 Verificación del error de acuerdo al número de neuronas en la capa oculta...95	
Tabla 18 Casos utilizados en la programación de Arduino	99
Tabla 19 Resultados del entrenamiento de la red neuronal.....	111
Tabla 20 Resultados del reconocimiento	118
Tabla 21 Dimensiones de las piezas a clasificar	120
Tabla 22 Información general del sistema	125
Tabla 23 Resultados de las pruebas de transporte del sistema	135
Tabla 24 Resultados finales de las pruebas del sistema	136
Tabla 25 Comparación con otros sistemas	137
Tabla 26 Frecuencia de valores observados.....	139
Tabla 27 Frecuencias de valores esperados	140
Tabla 28 Valores de Chi-Cuadrado	140
Tabla 29 Costos de los componentes del proyecto	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de una banda transportadora.....	10
Figura 2 Bandas de Caucho y Lona	11
Figura 3 Banda sintética.....	12
Figura 4 Bandas Modulares.....	13
Figura 5 Bandas de fibra de vidrio/teflón	13
Figura 6 Omni conveyor	14
Figura 7 Rueda cilíndrica.....	15
Figura 8 Rueda omnidireccional	15
Figura 9 Rueda cilíndrica.....	16
Figura 10 Motor NEMA 23.....	18
Figura 11 Tarjeta Arduino.....	19
Figura 12 Piezas de prototipado rápido	20
Figura 13 Componentes de una impresora 3D	21
Figura 14 Desplazamiento de capas en una pieza	22
Figura 15 Deformación de capas en una pieza.....	23
Figura 16 Warping en una Pieza	24
Figura 17 Pérdida completa de forma en una pieza	25
Figura 18 Webcam Logitech.....	27
Figura 19 Cámara estereoscópica.....	27
Figura 20 Intersección de ejes ópticos y el ángulo paraláctico β	28
Figura 21 Procesamiento de imágenes	29
Figura 22 Operador identidad.....	30
Figura 23 Operador inverso.....	30
Figura 24 Operador umbral	31
Figura 25 Transformaciones de imágenes.....	31
Figura 26 Operación de vecindad.....	32
Figura 27 Filtro Canny aplicado en una imagen.....	33
Figura 28 Esquema de una Neurona Artificial	35
Figura 29 Esquema de una ANN	37

Figura 30 Diagrama de subsistemas	38
Figura 31 Diagrama de Ejes	42
Figura 32 Matriz de movimiento a utilizarse.....	42
Figura 33 Ruedas omnidireccionales Rotacaster.....	43
Figura 34 CAD del eje para las ruedas de 48 mm	44
Figura 35 Diagrama de fuerzas del eje para las ruedas de 48 mm	44
Figura 36 Diagrama V-M del eje de las ruedas de 48 mm	46
Figura 37 Medidas del eje para las ruedas de 48 mm	46
Figura 38 Factores de concentración de esfuerzos	47
Figura 39 CAD del eje para las ruedas de 125 mm	49
Figura 40 Diagrama de fuerzas del eje para las ruedas de 125 mm	50
Figura 41 Diagrama V-M del eje de las ruedas de 125 mm	51
Figura 42 Medidas del eje para las ruedas de 125 mm	52
Figura 43 CAD del eje de la banda transportadora	54
Figura 44 Diagrama de fuerzas de la banda transportadora	54
Figura 45 Diagrama V-M del eje de la banda transportadora.....	56
Figura 46 Medidas del eje de la banda transportadora	56
Figura 47 Peso de ruedas omnidireccionales y sus ejes	58
Figura 48 Ejes X e Y armados con sus ruedas omnidireccionales.....	59
Figura 49 Soporte motor NEMA 23 (9 kg.cm).....	62
Figura 50 Soportes y cargas en la placa.....	62
Figura 51 Análisis estático.....	63
Figura 52 Sistemas de transmisión del mecanismo omnidireccional	65
Figura 53 Factores de servicio	66
Figura 54 Gráfica de la selección de correas.....	67
Figura 55 Polea	67
Figura 56 Poleas conductora y conducida	68
Figura 57 Sistemas de transmisión del mecanismo omnidireccional	69
Figura 58 Sistema de transmisión de Motor (14 kg.cm) – ruedas 48 mm	70
Figura 59 Sistema de transmisión de Motor (19 kg.cm) – ruedas 125 mm	70

Figura 60 Soporte de la cámara con altura variable	70
Figura 61 Soporte de la cámara con altura variable	71
Figura 62 Región de interés ideal	72
Figura 63 Ensamble de la máquina en un software CAD.....	72
Figura 64 Paredes matriz de ruedas omnidireccionales	73
Figura 65 Ejes del mecanismo omnidireccional	73
Figura 66 Depósitos	74
Figura 67 Base del mecanismo	74
Figura 68 Banda a utilizarse	74
Figura 69 Base de la banda transportadora.....	75
Figura 70 Ensamble de la banda transportadora	75
Figura 71 Ensamble de ruedas omnidireccionales	75
Figura 72 Soporte motor NEMA 23 (9 kg.cm).....	76
Figura 73 Soporte de cámara web.....	76
Figura 74 Ensamble los componentes de la banda transportadora	76
Figura 75 Sistemas de transmisión del mecanismo	77
Figura 76 Ensamble final del mecanismo omnidireccional.....	77
Figura 77 Distribución de pines Driver BL - TB6560 - V1.2 – 4.5A.....	79
Figura 78 Distribución de pines Driver BL - TB6600 - V1.2 - 5A	79
Figura 79 Pines utilizados de la tarjeta de control Arduino Uno	81
Figura 80 Pines de la fuente de alimentación 24V 15A (3DPS2415)	82
Figura 81 Diagrama del circuito eléctrico.....	83
Figura 82 Conexión driver-Arduino	83
Figura 83 Conexión drivers – fuente de alimentación	84
Figura 84 Base de soporte del circuito de control	84
Figura 85 Ubicación de canaletas.....	85
Figura 86 Circuito sobre la placa de soporte	85
Figura 87 Partes generales del mecanismo omnidireccional	86
Figura 88 Ubicación de la cámara web.....	87
Figura 89 Diagrama de flujo del programa.....	89

	xvi
Figura 90 Código para el filtrado de la imagen	89
Figura 91 Imagen con el filtro Canny	90
Figura 92 Aplicación del comando Dilate.....	90
Figura 93 Morfología de apertura y cierre para eliminar ruidos	90
Figura 94 Inversión de colores en la imagen	91
Figura 95 Filtrado final de la imagen con MedianBlur	91
Figura 96 Código para capturar y guardar la imagen.....	91
Figura 97 Bloc de notas con los datos binarios.....	93
Figura 98 Código para leer las imágenes y convertirlas en datos binarios.....	93
Figura 99 Definición de parámetros.....	94
Figura 100 Proceso de aprendizaje del programa	95
Figura 101 Resultados del aprendizaje del programa.....	96
Figura 102 Código para crear la base de datos	96
Figura 103 Carpeta con las imágenes a comparar	97
Figura 104 Resultado al correr el programa de clasificación.....	98
Figura 105 Declaración de los puertos a usar en el Arduino.....	98
Figura 106 Sentencias switch-case en Arduino	99
Figura 107 Creación de un nuevo proyecto en Qt	101
Figura 108 Pantalla para la creación de la interfaz gráfica	101
Figura 109 Código para la comunicación entre la GUI y Arduino.....	102
Figura 110 Código de la función timer para captura de frames.....	102
Figura 111 Código para mostrar la imagen original y filtrada en la GUI	102
Figura 112 Imagen original y filtrada en la GUI.....	103
Figura 113 Clases creadas por cada botón a utilizar	103
Figura 114 Botones utilizados en la GUI.....	104
Figura 115 Programación del botón Prueba 1	104
Figura 116 Inicialización de la GUI	105
Figura 117 Activación del botón “Inicio”	105
Figura 118 Activación del botón “Prueba 1”	106
Figura 119 Activación de “Verificado” luego de realizar las 3 pruebas.....	106

Figura 120 Piezas en forma de hexágono, cuadrado y C	107
Figura 121 Activación del botón “Combinación 1”	107
Figura 122 Activación del botón “Stop”	108
Figura 123 Muestras – Clasificación correcta: 32%	110
Figura 124 Muestras – Clasificación correcta: 42%	110
Figura 125 Muestras – Clasificación correcta: 100%	110
Figura 126 Ambiente poco iluminado	112
Figura 127 Ambiente con iluminación natural	112
Figura 128 Ambiente completamente iluminado	113
Figura 129 Sistema en ambiente con iluminación natural	114
Figura 130 Piezas a clasificar por el sistema	114
Figura 131 Reconocimiento de hexágono con agujero	115
Figura 132 Reconocimiento de cuadrado con agujero	116
Figura 133 Reconocimiento de letra C.....	116
Figura 134 Reconocimiento de figura errónea S.....	117
Figura 135 Reconocimiento de figura errónea hexágono con agujero	117
Figura 136 Reconocimiento de figura errónea letra C.....	118
Figura 137 Reconocimiento del hexágono con agujero	119
Figura 138 Reconocimiento del cuadrado con agujero	119
Figura 139 Reconocimiento de la letra C.....	119
Figura 140 Secuencia de pruebas del sistema	121
Figura 141 Combinaciones de movimientos de los motores	121
Figura 142 Botón Verificado	122
Figura 143 Botón Inicio.....	123
Figura 144 Arranque de las pruebas del sistema.....	123
Figura 145 Sistema verificado	123
Figura 146 Secuencia de movimiento - Prueba 1	124
Figura 147 Secuencia de movimiento - Prueba 2	124
Figura 148 Secuencia de movimiento - Prueba 3	125
Figura 149 Combinación 1.....	126

Figura 150 Combinación 2.....	126
Figura 151 Combinación 3.....	127
Figura 152 Ubicación de la pieza y el pallet.....	127
Figura 153 Pieza de la clase 2 ubicada debajo de la cámara	128
Figura 154 Combinación 1 – Pieza de la clase 2	128
Figura 155 Movimiento de la pieza #2 por el mecanismo	129
Figura 156 Combinación 1 – Pieza de la clase 0	129
Figura 157 Movimiento de la pieza de la clase 0 por el mecanismo	130
Figura 158 Combinación 1 – Pieza de la clase 1	130
Figura 159 Movimiento de la pieza de la clase 1 por el mecanismo	131
Figura 160 Combinación 1 – Pieza errónea de la clase 4.....	131
Figura 161 Movimiento de la clase 4 por el mecanismo	131
Figura 162 Combinación 1 – Pieza errónea de la clase 3.....	132
Figura 163 Movimiento de la pieza de la clase 3 por el mecanismo	132
Figura 164 Clasificación de la pieza de la clase 0 con la combinación 2	132
Figura 165 Clasificación de la pieza de la clase 2 con la combinación 2	133
Figura 166 Clasificación de la pieza de la clase 1 con la combinación 2	133
Figura 167 Clasificación de la pieza de la clase 3 con la combinación 2	133
Figura 168 Clasificación de la pieza de la clase 2 con la combinación 3	134
Figura 169 Clasificación de la pieza de la clase 1 con la combinación 3	134
Figura 170 Clasificación de la pieza de la clase 0 con la combinación 3	134
Figura 171 Clasificación de la pieza errónea con la combinación 3	135
Figura 172 Distribución de Chi-cuadrado.....	141

RESUMEN

El presente trabajo de titulación trata sobre el diseño y construcción de un mecanismo omnidireccional de transporte, clasificación y control de calidad de piezas provenientes de procesos de prototipado rápido (impresión 3D) mediante visión artificial. Dicho mecanismo está formado por una banda transportadora y un sistema de visión artificial, el mismo que será el encargado de tomar la información necesaria para realizar la clasificación y el control de calidad. Además, consta de una matriz de ruedas omnidireccionales que permiten el movimiento en el eje X y eje Y, de la pieza a ser analizada, esta se moverá por el sistema montada en un pallet, y será colocada en los depósitos de almacenamiento. En el sistema existen 3 depósitos, 2 para recibir las piezas correctas y uno para las erróneas. El propósito del proyecto fue demostrar que los mecanismos omnidireccionales pueden ser utilizados para transportar y clasificar piezas dentro de procesos industriales, siendo otra alternativa de uso que se suma a los pistones convencionalmente utilizados. El sistema es capaz de clasificar 3 tipos de piezas, ya que ha sido entrenado para ello, la discretización es realizada por el sistema de visión artificial, además permite una mejor interacción humano – máquina debido a que presenta una interfaz gráfica donde se detallan los procesos a realizarse, y la duración que cada proceso tiene. La interfaz gráfica consta de botones, los que permiten realizar pruebas de funcionamiento previo a su utilización general, después el usuario puede acceder a los botones que permiten realizar distintos tipos de clasificaciones. Además, un sensor de presencia permite cerciorarse de que existe un objeto al inicio del sistema y así, empezar el proceso de manera automática. El funcionamiento general del sistema logró un porcentaje de confiabilidad del 89%.

PALABRAS CLAVE:

- **MECANISMOS OMNIDIRECCIONALES**
- **RUEDAS OMNIDIRECCIONALES**
- **REDES NEURONALES**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**

ABSTRACT

The present certification work is about the design and construction of an omnidirectional transport, classification and quality control mechanism of parts coming from rapid prototyping processes (3D printing) through artificial vision. Such mechanism is formed by a conveyor belt and an artificial vision system, which will be responsible for taking the necessary information to perform the classification and quality control. In addition, it consists of a matrix of omnidirectional wheels that allow movement on the X and Y axis of the piece to be analyzed. It will move through the system mounted on a pallet, and will be placed in the storage deposits. In the system there are 3 deposits, 2 to receive the correct parts and one for the wrong ones. The purpose of the project was to demonstrate that the omnidirectional mechanisms can be used to transport and classify parts inside industrial processes, being another alternative of use that is added to the pistons conventionally used. The system is able to classify 3 types of pieces, since it has been trained for this, the discretization is done by the artificial vision system. It also allows a better human - machine interaction because it has a graphic interface where the processes are detailed to be done, and the duration that each process has. The graphic interface consists of buttons, which allow to perform tests of operation prior to its general use, then the user can push the buttons that allow different types of classifications. In addition, a presence sensor allows to make sure that there is an object at the beginning of the system, thus start in the process automatically. The general functionality of the system reached a reliability percentage of 89%.

KEYWORDS:

- **OMNIDIRECTIONAL MECHANISMS**
- **OMNIDIRECTIONAL WHEELS**
- **NEURAL NETWORKS**
- **ARTIFICIAL VISION**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los sistemas de transporte y clasificación de productos son ampliamente utilizados en la industria, es por ello que su optimización es crucial para definir la competitividad de una empresa en el mercado. Al optimizar estos sistemas se garantiza que la producción se agilice, logrando que se fabrique más productos en menor tiempo.

Un sistema convencional de transporte y clasificación utiliza varios recursos entre distintos tipos de sensores y actuadores. En la movilización de las piezas se utiliza generalmente una banda transportadora, para la discriminación entre objetos funcionales y obsoletos generalmente son empleados sistemas neumáticos, que demandan un coste de energía amplio para la empresa que utilice este sistema.

Otro aspecto fundamental a tomar en cuenta es el control de calidad en estos sistemas. Un método ampliamente utilizado es que una persona (operador) lo realice, pero está sujeto a fallas, ya que la calidad de la revisión que el individuo efectúe al producto depende directamente de su capacidad visual para discriminar errores, su estado de ánimo y el cansancio reflejado por las prolongadas horas de trabajo que es lo habitual en un ambiente industrial, por lo que estos sistemas deben ser optimizados.

En el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, actualmente no existen sistemas de transporte y clasificación omnidireccionales que realicen el control de calidad usando visión artificial, el presente

proyecto implementó un sistema de transporte y control de calidad usando visión artificial, para que sea una herramienta didáctica donde los alumnos que utilicen el laboratorio puedan aumentar sus conocimientos en automatización, y procesos de transporte de productos mediante mecanismos omnidireccionales, así como el uso de sistemas basados en algoritmos de visión artificial en procesos industriales.

Un mecanismo de transporte y clasificación omnidireccional es una alternativa de optimización efectiva para los sistemas antes mencionados, ya que permite movilizar al producto mientras lo clasifica, mejorando el tiempo en que la pieza pasa por todo el sistema. Otro detalle que es necesario mencionar es la adecuación de un control de calidad al sistema omnidireccional, que emplea algoritmos de visión artificial para definir si una mercancía es funcional o no.

Los parámetros antes mencionados agilitan los sistemas de clasificación y transporte de productos ya que eliminan los métodos tradicionales, adecuando tecnologías nuevas y de alto nivel, que se basan en mecanismos omnidireccionales para el transporte y clasificación, además se implementa la visión artificial para el control de calidad, asegurando que al final del recorrido del sistema se obtenga un resultado de calidad y confiable.

1.2. Antecedentes

Los procesos industriales han evolucionado por la necesidad producir más en menos tiempo por lo que a través del tiempo se han optimizado procesos para cumplir con esta necesidad. El transporte de material mediante cintas transportadoras, se remonta en el año 1795 y fueron empleadas principalmente en la industria minera. La

producción de cintas transportadoras de acero comenzó en el año de 1901 y su inventor fue Sandvik. La cadena de montaje basada en cintas transportadoras fue introducida en las fábricas de producción de la Ford Motor Company por su fundador Henry Ford en 1913 (Rellwin, 2013).

La mayoría de sistemas de clasificación utilizan actuadores neumáticos, los mismos que requieren de varios componentes como compresores, válvulas, mangueras (Creus, 2007). Esto se traduce en altos costos, uso de gran cantidad de espacio útil en la empresa y no es favorable para el proceso de producción.

Los sistemas omnidireccionales se han desarrollado en los últimos años con el fin de utilizar poco espacio y realizar una clasificación más rápida donde todos los componentes utilizados son eléctricos lo que evitaría el uso de varios dispositivos como ocurre en los sistemas neumáticos.

Usar visión artificial ha sido lo más novedoso en los últimos años para varias aplicaciones como inspección, identificación, vigilancia, bioingeniería, etc., esto se realiza por medio de un software de programación y una cámara que permite capturar las imágenes con las que se trabajará.

Dentro de la visión artificial los primeros sistemas se basaron en imágenes binarias cuyo procesamiento se daba en bloques, ventanas o píxeles. El desarrollo de nuevos algoritmos de visión artificial permitió el reconocimiento del contorno y posición de un objeto dentro de una imagen captada por una cámara, pero estos algoritmos no podían ser implementados dentro de la industria debido a que ésta demandaba sistemas capaces de operar en condiciones variables, sin la necesidad de ser modificados y a altas velocidades. (Mendieta, 2003)

Luego se introdujeron los sistemas que son capaces de captar la intensidad de gris; con esta técnica se logró corregir las variaciones de iluminación presentes en la imagen, ya que así se puede encontrar el borde de los objetos utilizando los cambios en los valores de intensidad de los píxeles, permitiendo operar en diferentes condiciones de luz (Mendieta, 2003).

En la actualidad los sistemas de visión artificial operan sobre estructuras en lugar de píxeles, los mismos que necesitan procesadores de alta velocidad para interpretar la gran cantidad de datos recibidos y la calidad digital de las imágenes (Mendieta, 2003). Los sensores ayudan mucho al momento de adquirir señales para activar un actuador, pero estos trabajan bajo ciertas condiciones que hay que tomar en cuenta, lo que no pasa con los sistemas de visión artificial que pueden adquirir señales sólo con la condición de que el objeto tenga buena iluminación.

El control de calidad de un producto se lo ha realizado desde hace mucho tiempo, pero ha ido evolucionado para que este trabajo sea más rápido usando visión artificial, donde se puede captar las fallas de los productos de manera más rápida y sin intervención humana (Tornero, 2012).

1.3. Descripción resumida del proyecto

El presente proyecto buscó demostrar la factibilidad de implementar un sistema omnidireccional para el transporte y clasificación de productos en ambientes industriales, tomando en cuenta que el control de calidad en este sistema fue realizado mediante visión artificial para garantizar que los objetos sean analizados a detalle y presenten una óptima calidad al final del proceso.

El sistema inicialmente detecta la presencia de objetos de dimensiones máximas 15 x 15 x 15 [cm] y con una altura mínima de 1.5 cm, luego estos son transportados mediante una banda hacia la parte de visión artificial, donde se extrae la información pertinente de los mismos. Esta información es analizada por los algoritmos de control por visión artificial para comandar el mecanismo omnidireccional, que se encarga de transportar y clasificar al objeto.

En general se realizó un estudio de las características propias de los objetos, como por ejemplo la forma, la textura, el color, las dimensiones etc. plasmado en una imagen, definiendo las regiones de interés que indican si los objetos están en óptimas condiciones o deben ser rechazados. Los parámetros de aceptación de los objetos fueron mediante el análisis de características intrínsecas de las imágenes tomadas, realizando un estudio de las características más relevantes a tomarse en cuenta. Para esto se definieron los algoritmos de control que comandan al sistema omnidireccional que es el que clasifica a las piezas entre buenas o malas. La imagen se obtiene a través de una cámara instalada al inicio del sistema, la que actúa como sensor de entrada.

Fue necesario realizar un estudio preliminar sobre los elementos que integraron el mecanismo, para tener un amplio criterio de selección de los materiales a utilizarse según el diseño estructural del sistema, en el cual se definieron las dimensiones y configuración de la estructura mecánica lo que aseguró que el sistema sea óptimo, además la investigación abarcó un estudio sobre la mejor configuración del sistema omnidireccional que se implementó.

El movimiento del mecanismo omnidireccional es comandado por los datos obtenidos de la imagen del objeto en el control de calidad (visión artificial), mediante un

circuito de adquisición de señal. El sistema omnidireccional está conformado por una matriz de elementos rotatorios que permiten el movimiento de los objetos mediante una distribución de elementos en x e y, es decir los elementos son transportados en dirección vertical y horizontal, pudiéndose realizar pruebas sobre otros movimientos complejos adicionales al sistema.

Para el control de calidad se diseñó un ambiente de recepción de imagen óptimo, que permitió determinar todas las características necesarias de los objetos para enfatizar un criterio de clasificación alto, es decir definir las variables a tomar en cuenta al momento de implementar las sentencias de programación de tratamiento de imágenes que permitan discernir y distinguir objetos.

El ensamble del mecanismo omnidireccional se realizó después de validar su diseño en un software CAD, para identificar la configuración más óptima y que el diseño mecánico no falle.

En este trabajo se realizó las pruebas y evaluaciones del sistema de transporte y clasificación omnidireccional guiado por visión artificial, determinando su factibilidad y precisión en trabajo continuo. Además, se realizó una comparación entre el sistema implementado y los sistemas convencionales de transporte y clasificación de objetos.

1.4. Justificación e importancia

Dentro de los procesos industriales se necesita optimizar procesos por lo que es adecuado innovar los mismos, las bandas transportadoras y los pistones ya han sido usadas por mucho tiempo para el transporte y clasificación, y esto puede ser reemplazado con un sistema que realiza ambas tareas al mismo tiempo.

Un sistema omnidireccional va a ser el encargado de realizar las tareas de transporte y clasificación debido a que está compuesto por ruedas omnidireccionales que son capaces de transportar un objeto en cualquier dirección, con un control adecuado, produciendo una fricción mínima por lo que es un sistema rápido y eficaz.

El sistema omnidireccional será parte de un sistema FMS que se implementará en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga para realizar la fabricación de piezas, clasificación, control de calidad y ensamblaje de las mismas. Permitirá al estudiante realizar prácticas de tal manera que conozca las ventajas que tiene la visión artificial para realizar distintos tipos de tareas, especialmente para realizar clasificación y control de calidad como en este caso. Los estudiantes en las prácticas podrán observar las características, funciones principales y ventajas de utilizar un sistema omnidireccional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema omnidireccional de transporte para la clasificación y control de calidad usando visión artificial para el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Investigar sobre cada elemento que va a formar parte del sistema omnidireccional de transporte, clasificación y control de calidad.

- Seleccionar los diferentes dispositivos a implementarse para la clasificación y el control de calidad de las piezas.
- Realizar el diseño de la estructura del mecanismo omnidireccional.
- Diseñar el circuito para el control de los motores de la banda y las ruedas.
- Ensamblar los dispositivos en el sistema de transporte con sus respectivas conexiones para un funcionamiento óptimo.
- Realizar los algoritmos de programación necesarios para el transporte, control de calidad y clasificación por forma, usando visión artificial.
- Realizar las pruebas pertinentes para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y compararlo con los sistemas tradicionales.

1.6. Hipótesis

¿El sistema omnidireccional de transporte permitirá la clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido usando visión artificial en el laboratorio de Mecatrónica?

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

2.1. Sistemas de Transporte en la Industria

Por lo general, para el transporte de productos en la industria se utilizan cintas o bandas transportadoras las mismas que presentan características amplias dependiendo de su forma y diseño. En su forma más simple, un transportador de cintas está compuesto por un tambor motriz, un tambor de cola, el dispositivo de tensado, una cinta transportadora y la estructura de soporte de la cinta (base de deslizamiento o rodillos portantes) (Habasit, 2017).

2.1.1. Bandas Transportadoras

Las bandas transportadoras son los dispositivos de transporte más empleados para el desplazamiento de objetos sólidos y materiales a granel a gran velocidad y cubriendo grandes distancias. El transportador de banda consta de: (ver Figura 1)

1. Tambor impulsor
2. Órgano de tracción
3. Descargador
4. Rodillos de apoyo en el ramal de trabajo
5. Dispositivo cargador
6. Tambor tensor extremo
7. Dispositivo tensor
8. Rodillos de apoyo libres

9. Bastidor metálico
10. Tambor desviador
11. Tambor del dispositivo

En este tipo de transportadores se emplean distintos tipos de bandas:

1. Tela de caucho con tejido de algodón
2. De fibra
3. De acero totalmente laminadas o fabricadas de alambre
4. De tela de caucho con cuerdas de acero vulcanizadas en su interior

Las bandas transportadoras deben reunir las siguientes características:

1. Alta resistencia mecánica longitudinal.
2. Flexibilidad en dirección longitudinal para tambores y transversal para apoyos en rodillos.
3. Elevada resistencia al desgaste.
4. Poca elasticidad y alta resistencia a la humedad.

Las ventajas de las cintas transportadoras consisten en su bajo peso propio, ausencia de articulaciones de rápido desgaste y posibilidad de desplazar la carga a elevadas velocidades. (Miravete, Larrodé, Castejón & Cuartero, 1998)

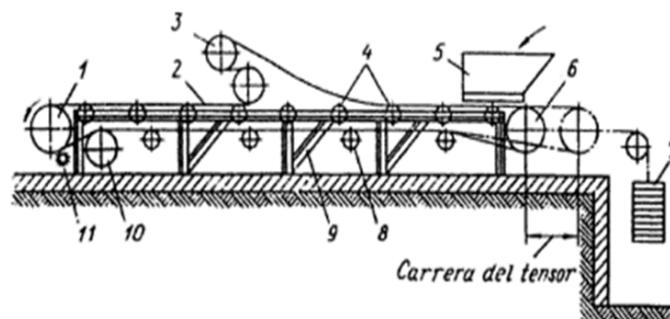


Figura 1 Esquema de una banda transportadora
Fuente: (Miravete, Larrodé, Castejón & Cuartero, 1998)

2.1.2. Tipos de bandas transportadoras

Dentro del mercado se ofertan diferentes tipos de bandas dentro de las cuales se tienen las siguientes:

a. Banda de caucho y lona:

Es la banda más utilizada, como se observa en la Figura 2 están compuestas por varias capas de tejidos engomados, logrando una gran adherencia, separadas por una capa de goma intermedia que mejora su flexibilidad. Los tejidos más utilizados en la fabricación de bandas textiles son formados por fibras de poliéster en el sentido longitudinal y de nylon en el sentido transversal.

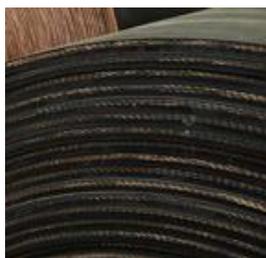


Figura 2 Bandas de Caucho y Lona

Fuente: (Provecuador, 2014)

Este tipo de tejido presenta características de gran flexibilidad, peso reducido, buena resistencia a la rotura, impacto, corte, temperatura, a la humedad y no interfiere con sistemas de detección de metales. Debido a que este tejido no es afectado por la humedad estas bandas pueden ser utilizadas con los cantos cortados (lonas a la vista en los bordes), consiguiéndose ahorro en los costes y alta garantía en funcionamiento (Provecuador, 2014).

b. Banda Sintética

Es la banda más flexible, adaptable, rastreadable y resistente al desgaste por su precisión y revestimiento. Este tipo de bandas posee una base de fibra de vidrio tejida,

revestida en una o ambas caras con caucho de silicona, obteniendo como resultado una banda con resistencia, alargamiento bajo, excelente tracción y estabilidad dimensional.

El color de la superficie de la banda sintética puede ser de color blanco o tintado debido a las características propias de la silicona como se observa en la Figura 3. Estas bandas son por lo general utilizadas en transportadores ligeramente inclinados u otras aplicaciones donde se desea una superficie de alto agarre y excelentes características de liberación.



Figura 3 Banda sintética

Fuente: (Provecuador, 2014)

c. Bandas Modulares

Las bandas modulares son comúnmente fabricadas de polipropileno, polietileno y acetal, son utilizadas tanto en el sector alimentario como en el industrial. Dentro de sus principales características destaca una alta resistencia mecánica, una gran variedad de pesos, flotabilidad en el agua y tiene un rango de temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+104\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como se puede ver en la Figura 4 esta banda está compuesta por varios módulos y tiene una alta resistencia química a casi todos los ácidos, detergentes, sales y bases concentradas, por lo tanto, tiene buen funcionamiento en ambientes corrosivos, además es muy resistente ante la penetración de microorganismos.



Figura 4 Bandas Modulares

Fuente: (Provecuador, 2014)

d. Bandas de Fibra de Vidrio/Teflón

Son bandas especialmente fabricadas para aplicaciones de aislamiento térmico, resistencia a productos químicos, procesos de cocción de alimentos y aplicaciones de alta temperatura. Este tipo de bandas están fabricadas a partir de sustratos de fibra de vidrio tejida con un revestimiento de politetrafluoroetileno (PTFE) o teflón lo que les brinda una gran adherencia y resistencia a rayados, ideal para alimentos como se observa en la Figura 5. La principal característica de este material es que es prácticamente inerte ya que no reacciona con otras sustancias químicas. Esta característica de reactividad hace que su toxicidad sea nula. (Provecuador, 2014).



Figura 5 Bandas de fibra de vidrio/teflón

Fuente: (Provecuador, 2014)

2.1.3. Sistemas de transporte omnidireccionales

Uno de los principales inconvenientes de los transportadores convencionales es que permiten movimientos lineales y sólo en una dirección. Los sistemas transportadores

omnidireccionales hacen el uso de ruedas omnidireccionales (*Omni Wheels*), las cuales les permiten realizar movimientos laterales a medida que se mueven por el transportador. Este tipo de movimientos pueden ser utilizados para orientar a las piezas o a los productos mientras estos son transportados sin la necesidad de agregar mecanismos externos para ello.

Cada rueda omnidireccional está construida con varios rodillos de giro libres que están montados alrededor de la periferia de la rueda principal. Además de proporcionar 360° de rotación, las ruedas omnidireccionales también son resistentes a la corrosión, lo que las hace adecuadas para entornos que contienen suciedad y humedad. Además, no se requiere mantenimiento para mantenerlas funcionando correctamente.

Las ruedas omnidireccionales se pueden utilizar tanto en sistemas de transporte por gravedad como de potencia. Están diseñadas para acomodar cargas pesadas. Se pueden ubicar en diferentes partes de un sistema de transporte, así como el transportador mismo o una mesa de transferencia (ver Figura 6). También son adecuadas para su uso en robótica, ya que permiten el movimiento hacia adelante y lateral. (Ensalco, 2017)



Figura 6 Omni conveyor

Fuente: (Ensalco, 2017)

2.1.4. Tipos de ruedas para el transporte

a. Ruedas cilíndricas

La característica primordial de este tipo de llantas es que poseen una periferia cilíndrica, dicha periferia puede o no tener pistas sobre ella. Este tipo de llantas pueden estar elaboradas de diferentes tipos de materiales dependiendo de las necesidades de la base y del diámetro (ver Figura 7).



Figura 7 Rueda cilíndrica
Fuente: (Parmar & Savant, 2014)

b. Ruedas Omnidireccionales

Las ruedas omnidireccionales están caracterizadas por tener rodillos montados en la periferia de la llanta como se observa en la Figura 8, tal que el eje de cada rodillo es perpendicular al eje de la base de la llanta. Para operaciones suaves los rodillos son montados sobre rodamientos.



Figura 8 Rueda omnidireccional
Fuente: (Parmar & Savant, 2014)

c. Ruedas mecanum

Estas son ruedas similares a las omnidireccionales con la diferencia que los rodillos tienen una inclinación de 45 grados con respecto al eje de la base de la rueda como se ve en la Figura 9. Una característica de este tipo de ruedas es que los rodillos siempre están montados sobre cojinetes. Dependiendo de la posición de la llanta los rodillos están inclinados 45 grados en dirección derecha o izquierda.



Figura 9 Rueda cilíndrica
Fuente: (Parmar & Savant, 2014)

2.2. Motores DC

Un motor de corriente continua (DC), es una máquina que convierte energía eléctrica en energía mecánica, generando un movimiento rotatorio, mediante la acción de un campo eléctrico.

Los motores alimentados por corriente continua tienen múltiples aplicaciones, y a pesar que ya tienen 125 años de existencia se han sabido adaptar muy bien a las exigencias del mercado. Este tipo de motores se utiliza en grúas que requieran precisión de movimiento con carga variable, algo que es muy difícil de conseguir con motores de corriente continua. Son generalmente utilizados para aplicaciones que necesite gran precisión de movimiento y variantes de velocidad, ya que el control de velocidad en estos motores es mucho más sencillo.

Según Roldán (2014) El par de un motor es una magnitud mecánica muy importante que define la fuerza que un motor es capaz de desarrollar en cada revolución. Es muy importante conocer las curvas de par que puede suministrar un motor ya que esto permite una mejor selección. El par motor esta expresado por la letra M , sus unidades son (Nm), cuya fórmula se describe a continuación:

$$M = (9550.P)/n \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P – Potencia en Kw.

n – Revoluciones Nominales, en rpm.

Para el cálculo de la fuerza empleada por el motor (F) que va a transmitir movimiento en un plano horizontal se utiliza:

$$F = m.g \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

m – Masa del objeto o sistema a mover en kg.

g – Aceleración de la Gravedad, en m/s^2 .

2.2.1. Motores paso a paso

Los motores paso a paso son muy importantes cuando se requieren movimientos precisos en la construcción de mecanismos. Su principal característica es que se los puede mover un paso a la vez por cada pulso que se aplique, el cual puede variar desde 90° hasta movimientos más pequeños de 1.8° .

Básicamente los motores paso a paso están constituidos por un rotor sobre el que están distintos imanes permanentes y una cierta cantidad de bobinas excitadoras

bobinadas en su estator. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deben ser externamente manejadas por un controlador.

Los principales motores paso a paso son los bipolares y los unipolares. Los bipolares son aquellos que constan de cuatro cables y necesitan de dos puentes-H para ser controlados; y los unipolares constan de 6 o 5 cables y se caracteriza por ser más simple de controlar. (Casas, 2004)

Los motores paso a paso más usados son los NEMA 17 y NEMA 23 (ver Figura 10) cuya diferencia radica en el torque que generan y la corriente que necesitan cada uno de estos.

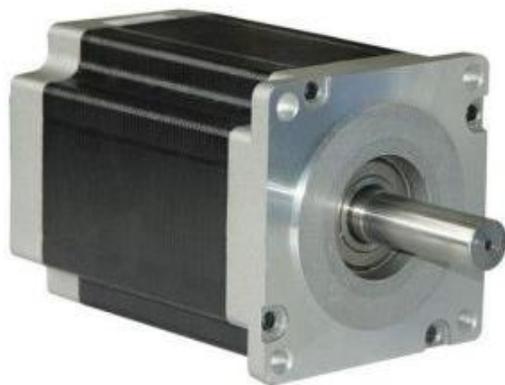


Figura 10 Motor NEMA 23
Fuente: (Ingeniería Mecafenix, 2017)

2.3. Tarjeta Arduino

Arduino es una plataforma de hardware, software y contenido de código abierto con una comunidad global. Está destinado a cualquier persona que realice proyectos interactivos (Arduino, 2018). Las partes principales de la tarjeta Arduino se observan en la Figura 11.

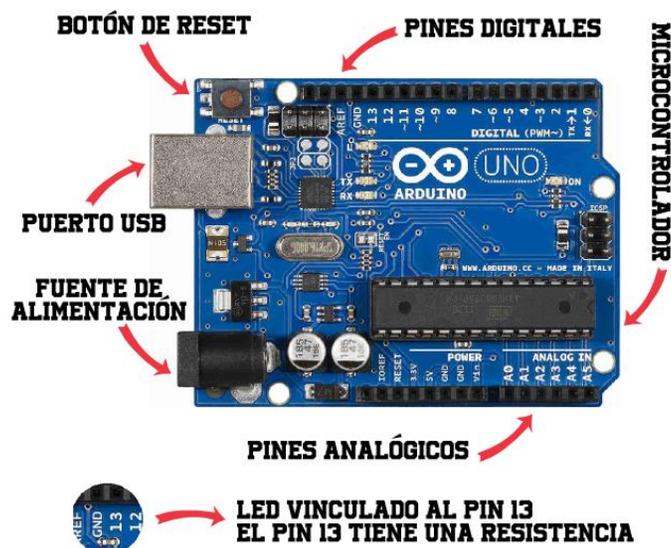


Figura 11 Tarjeta Arduino

Fuente: (Caviedes, 2017)

La principal ventaja de utilizar una tarjeta Arduino es que maneja código abierto (*Open Source*), lo que facilita la conexión e implementación en cualquier máquina o sistema. Su lenguaje de programación maneja librerías propias de C++.

2.4. Piezas de prototipado rápido

Las piezas de prototipado rápido son modelos físicos provenientes de procesos de impresión 3D que actualmente están presentando mejores prestaciones a nivel industrial ya que permiten crear modelos de piezas 3D muy precisos y de altas prestaciones.

Los procesos de prototipado rápido se definen como el conjunto de técnicas que permiten obtener de la manera más rápida una réplica tridimensional de un diseño generado mediante una aplicación CAD en 3D. Estos modelos físicos pueden ser desarrollados únicamente por fines estéticos y útiles para el estudio del mercado al cual van dirigidos, o ser diseñados para cumplir con un fin mecánico en específico ya que las

prestaciones de los modelos son amplias como se ve en la Figura 12, ofreciendo en este caso realizar pruebas funcionales y de homologación antes de que siquiera existan los moldes finales. (Sánchez, Fernández & Llorente , 2004)



Figura 12 Piezas de prototipado rápido

Fuente: (Ideas Sólidas, 2015)

Según Stratasys (2018) Las técnicas de prototipado rápido ofrecen múltiples ventajas, entre ellas:

- Comunicación rápida y eficaz de las ideas de diseño
- Validación eficaz del ajuste, la forma y la función del diseño
- Mayor flexibilidad de diseño, con la posibilidad de pasar rápidamente por diversas iteraciones en el proceso de diseño
- Menos errores de producción y mejores productos finales

2.5. Criterios de clasificación y control de calidad

Según Dima3D (2013) dentro de las malformaciones y errores de impresión que puede sufrir una pieza impresa en 3D existen varias, sin embargo, es importante saber cuáles pueden ser los motivos para algunos errores comunes, y qué componentes de la impresora están ligados a ellos como se observa en la Figura 13.

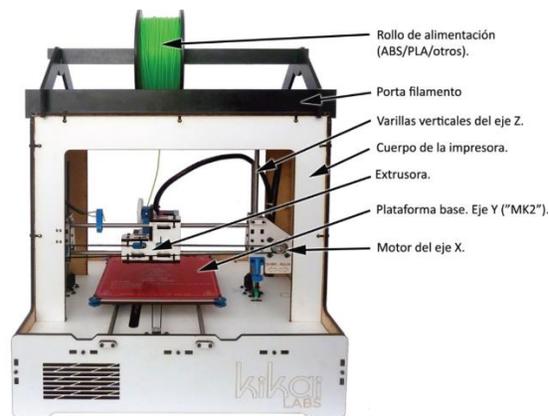


Figura 13 Componentes de una impresora 3D

Fuente: (Ideas Sólidas, 2015)

Los defectos o fallas en una pieza impresa pueden provenir de diferentes causas, desde la mala configuración del software utilizado, hasta posibles fallos mecánicos o eléctricos de la máquina empleada.

Los errores más comunes de una pieza proveniente de procesos de prototipado rápido están los siguientes:

- Problemas de deformación
- Problemas de capa
- Problemas de extrusión
- Problemas de acabado superficial

Dentro de las deformaciones tenemos:

- Desplazamiento de capas
- Deformación en las capas
- *Warping*
- Pérdida completa de forma en las piezas

2.5.1. Desplazamiento de Capas

Las piezas presentan una forma escalonada, donde una o varias capas se ha desplazado en direcciones paralelas a la base de impresión, ya sea en el eje X o Y, como se observa en la Figura 14.

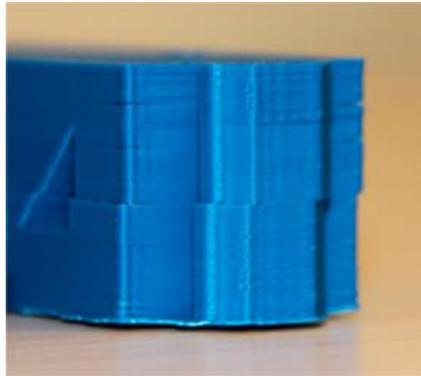


Figura 14 Desplazamiento de capas en una pieza

Fuente: (Dima3D, 2013)

Entre las principales causas de este defecto se tienen:

- Mal ajuste del sistema de transmisión en el eje correspondiente.
- Reseteo del driver por aumento excesivo de temperatura, produciendo que el motor deje de funcionar instantáneamente.
- Mal funcionamiento de los drivers de potencia

Entre las soluciones para el desplazamiento de capas están:

- Revisar continuamente la tensión de las correas, para verificar si están correctamente ajustadas.
- Mantener los drivers de los motores a pasos bien refrigerados, comprobando el correcto funcionamiento de ventiladores y disipadores.
- Revisar la calibración de los drivers.

2.5.2. Deformación en las Capas

Se presentan capas deformadas en la pieza impresa, incluso presentando cambios de color entre las capas de las piezas, las paredes se expanden hacia fuera y aparecen bultos como se muestra en la Figura 15.



Figura 15 Deformación de capas en una pieza

Fuente: (Dima3D, 2013)

Este tipo de error se debe generalmente, a que no se está dando tiempo a que las capas impresas se enfríen antes de que el extrusor vuelva a pasar por encima de ellas, para imprimir la siguiente, por lo tanto, las capas se imprimen encima del material aún fundido y fácilmente moldeable. Entre las formas para solucionar este error se tienen:

- Aumentar la potencia de enfriamiento de los ventiladores.
- Imprimir a una velocidad más lenta.

2.5.3. Warping

La pieza impresa se comba de una esquina, incluso despegándose de su base, como se muestra en la Figura 16.

Este es un problema muy común en impresión 3D, cuando se utilizan ciertos materiales como el ABS. Entre las principales causas están:

- Pérdida de adherencia en la superficie de apoyo de la pieza en la impresora.

- Ciertas geometrías son más propensas a generar este tipo de efectos, debido a las tensiones internas que se producen en la pieza impresa a causa del enfriamiento del material.
- La base de apoyo de la pieza en la impresora no se encuentra bien nivelado afectando la adherencia de la base de la pieza en la máquina.



Figura 16 Warping en una Pieza

Fuente: (Dima3D, 2013)

Solucionar el *warping* es muy complicado, pero se pueden tomar en cuenta los siguientes consejos:

- Conocer las características de adherencia del material que se va a procesar, para precalentar la base de la máquina para asegurar una buena adherencia.
- Es recomendable que ante geometrías complejas utilizar un bajo porcentaje de relleno para asegurar que las tensiones internas de la pieza la enfriarse se disminuyan.
- Una buena nivelación de la base de la máquina y una buena calibración de la altura del eje Z.

2.5.4. Pérdida completa de forma y acumulación de material:

La pieza se ha despegado de la base de la impresora y el extrusor sigue depositando material en la base, haciendo que las capas no se depositen una debajo de la otra. La impresora continúa imprimiendo, pero la pieza se desplaza logrando una pieza totalmente deforme y alejada de la geometría buscada, como se muestra en la Figura 17.

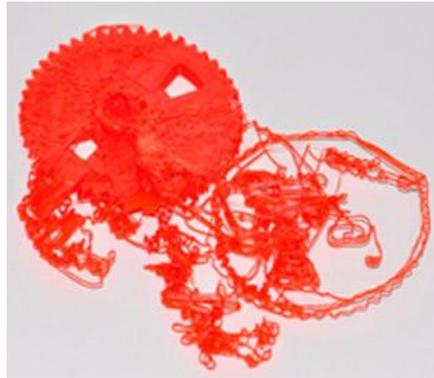


Figura 17 Pérdida completa de forma en una pieza

Fuente: (Dima3D, 2013)

Entre las principales causas que producen esta malformación se tienen que:

- Mala preparación de la base de la impresora, ya que no sostiene bien el material depositado.
- Descenso de la temperatura de la base de la impresora durante la impresión, provocados por mala toma de medidas de los sensores de la máquina.

Esta malformación es difícil de solucionar, pero se puede tomar en cuenta lo siguiente:

- Conocer las características de adherencia del material que se va a procesar, para precalentar la base de la máquina para asegurar una buena adherencia.
- Conocer el estado de la cama de la impresora (que funcione en perfecto estado) y comprobar el perfecto funcionamiento del termistor.

Una pieza impresa es de buena calidad dependiendo de la calidad de la impresión y del tipo de impresora y material del que provenga, además un criterio que es muy importante mencionar es que la forma descrita en el CAD es lo que se debe de obtener luego de imprimir, por lo tanto, es necesario controlar la forma de la pieza.

La clasificación y el control de calidad en el presente proyecto están basadas en los criterios de forma de la pieza impresa, por tal motivo las piezas que van a ser aceptadas dentro de la clasificación son las que no presenten las malformaciones antes mencionada.

2.6. Dispositivos para la adquisición de imágenes

Actualmente existen varios tipos de cámaras con distintas características para adquirir imágenes y poder usarlas en un sistema de visión artificial, los dispositivos más usados son: la cámara web y la cámara estereoscópica.

2.6.1. Cámara web

Este tipo de cámara es un dispositivo muy utilizado en varias aplicaciones como videochats, capturar imágenes y enviarlas por internet, etc. a través de una conexión USB o RS-232 (ver Figura 18).

Su funcionamiento parte de los rayos de luz que provienen de los objetos que pasan por el lente de la cámara y se reflejan en un filtro RGB descomponiendo la luz en tres colores: rojo, verde y azul; luego estos rayos se concentran en un chip sensible a la luz, que puede ser CMOS o CCD, y se codifican con valores binarios para después ser enviados al computador y puedan ser interpretados dando como resultado la imagen adquirida.

Los sensores CMOS y CCD están fabricados con materiales semiconductores como el Metal-Óxido (MOS) y su estructura es en forma de una matriz. Estos sensores funcionan cuando se acumula una carga eléctrica en cada celda de la matriz en proporción a la intensidad de la luz que incide sobre ella (Palazzesi, 2006).



Figura 18 Webcam Logitech

Fuente: (Logitech, 2018)

2.6.2. Cámara estereoscópica

Esta es un tipo especial de cámara ya que está compuesta por dos o más lentes como se ve en la Figura 19 y su funcionamiento de consiste en obtener una vista tridimensional de lo que pasa frente a sus lentes. La cámara estereoscópica funciona de manera similar al ojo humano, ya que es capaz de captar la imagen en tres dimensiones involucrando las sombras, el tamaño relativo de los objetos o mediante la perspectiva. (Cárdenas & Morales , 2015)



Figura 19 Cámara estereoscópica

Fuente: (ingeniatic, 2011)

En el proceso de observación de un objeto de una cámara estereoscópica se realizan movimientos conocidos como acomodación y convergencia como se puede ver en la Figura 20, los cuales se producen de manera simultánea para garantizar la comodidad en la observación. La intersección de la convergencia de los ejes ópticos genera un ángulo denominado paraláctico cuyo valor depende directamente de la distancia entre el observador y el objeto. (Cárdenas & Morales , 2015)

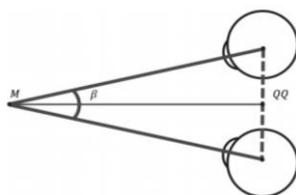


Figura 20 Intersección de ejes ópticos y el ángulo paraláctico β

Fuente: (Cárdenas & Morales , 2015)

2.7. Procesamiento digital de imágenes

2.7.1. Introducción

El procesamiento digital de imágenes (PDI) se basa en el tratamiento, procesamiento y análisis de toda la información que existe en una imagen como se ve en la Tabla 1, esto se aplica principalmente para mejorar una imagen que será usada durante algún proceso. (Chacón, 2007)

El fin del PDI es encontrar todos los detalles característicos posibles en una imagen a través de varios algoritmos de programación que se basan en procesos matemáticos, para lograr filtrar la imagen lo mejor posible para que esta sea usada en futuras aplicaciones.

Tabla 1

Niveles de visión y procesos del PDI

Nivel de visión	Procesos del PDI
Bajo	Captura/Adquisición
	Pre-procesamiento
Medio	Segmentación
	Descripción
	Reconocimiento
Alto	Interpretación

Fuente: (García, 2010)

El procesamiento de imágenes requiere de ciertos pasos para que esta pueda ser tratada (ver Figura 21).

- **Adquisición:** Una imagen digital es producida por sensores digitales presentes en cámaras y otros dispositivos digitales que generan una imagen bidimensional (2D), es decir, un conjunto de $N \times M$ píxeles o colores o intensidades de un cierto valor que representan el espacio que queremos analizar.
- **Procesamiento:** Antes de extraer información directamente de la imagen, se acostumbra a hacer un procesamiento previo de la misma para conseguir otra que nos permita hacer el proceso de extracción de datos más sencillo y eficiente.
- **Extracción de datos:** Una vez que se tenga la imagen preparada, se aplica una serie de algoritmos para extraer los datos de la misma. Se puede reconocer en la imagen, por ejemplo, las líneas, los círculos, las manchas, las esquinas, el movimiento, un determinado color..., o bien ciertos patrones de imagen previamente determinados. (García, 2010)



Figura 21 Procesamiento de imágenes

Fuente: (García, 2010)

2.7.2. Operaciones con imágenes

a. Operaciones individuales

Estas operaciones tienen por objetivo la generación de una nueva imagen modificando el valor del píxel en una simple localización. El proceso consiste en modificar

el valor de un píxel mediante una operación lineal o no lineal y colocando el valor del nuevo píxel en la correspondiente localización de la nueva imagen (Pajares & de la Cruz, 2002).

Los operadores más utilizados son:

- Operador Identidad: Crea una imagen de salida idéntica a la imagen de entrada como se observa en la Figura 22.

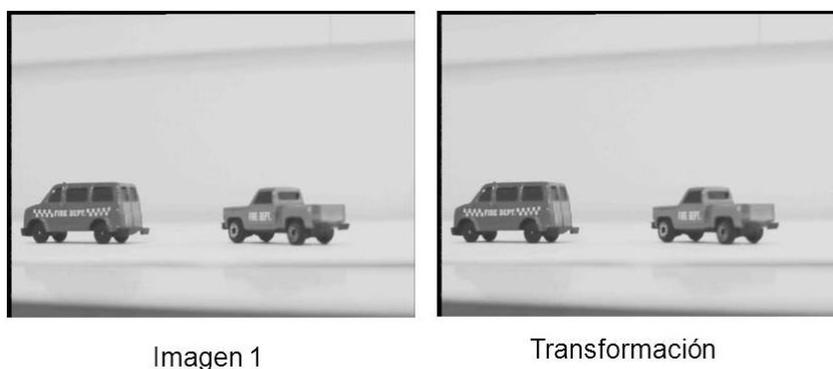


Figura 22 Operador identidad
Fuente: (Pajares & de la Cruz, 2002)

- Operador Inverso: Crea una imagen de salida inversa a la imagen de entrada; es muy útil en aplicaciones médicas como se observa en la Figura 23.

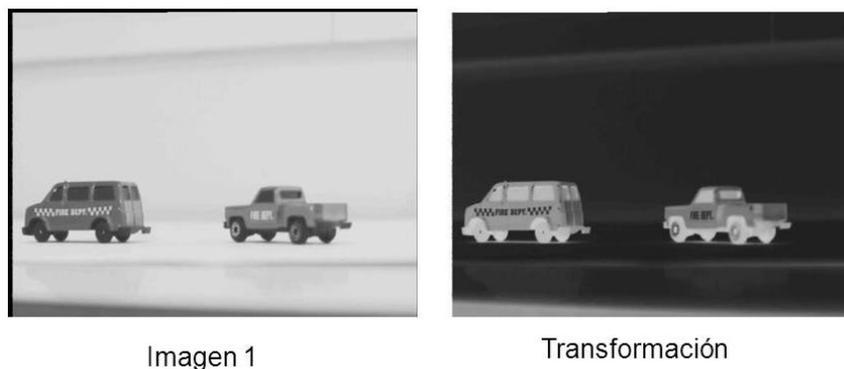


Figura 23 Operador inverso
Fuente: (Pajares & de la Cruz, 2002)

- Operador umbral: Crea una imagen de salida binaria a partir de una imagen de grises como se observa en la Figura 24.

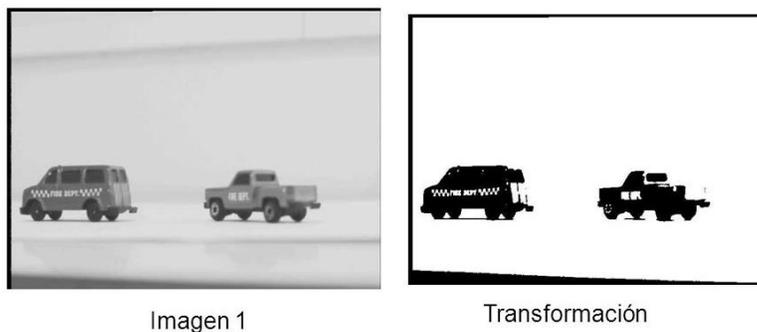


Figura 24 Operador umbral

Fuente: (Pajares & de la Cruz, 2002)

- Transformaciones de dos imágenes punto a punto: Utiliza dos imágenes de entrada para crear una nueva imagen realizando operaciones como adición o sustracción como se ve en la Figura 25. (Pajares & de la Cruz, 2002)

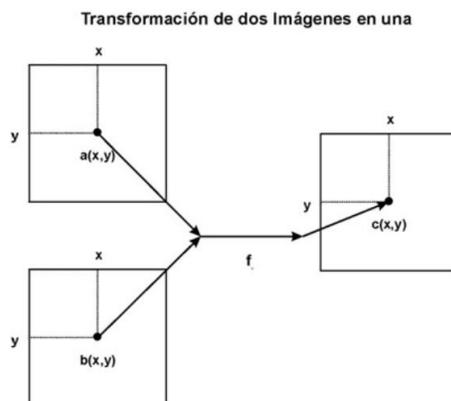


Figura 25 Transformaciones de imágenes

Fuente: (Pajares & de la Cruz, 2002)

b. Operaciones de vecindad

En este tipo de operaciones el nuevo valor del píxel de la imagen de salida depende de la combinación de los valores de los píxeles en la vecindad del píxel de la imagen que va a ser transformada (ver Figura 26). (Pajares & de la Cruz, 2002)

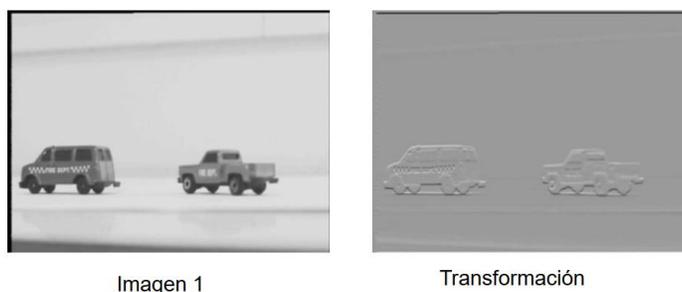


Figura 26 Operación de vecindad

Fuente: (Pajares & de la Cruz, 2002)

c. Transformaciones geométricas

Se las utiliza para poder modificar las coordenadas espaciales de una imagen, es decir, transformar los valores de una imagen como tal y poder observarla desde otro punto de vista. Entre las principales transformaciones geométricas se tienen:

- Interpolación: Es el cálculo del valor de intensidad de un píxel en función de los demás que lo rodean.
- Cambio de escala: Es el cambio de tamaño, ya sea ampliación o reducción, de un conjunto de píxeles de una imagen.
- Giros: Se los utiliza para dar ciertos efectos a la imagen o para corregir defectos de una imagen mal capturada. (Pajares & de la Cruz, 2002)

d. Operador de detección de bordes Canny

Según Solomon y Breckon (2011) el método Canny es generalmente reconocido como el mejor método de detección de bordes desarrollado hasta la fecha (ver Figura 27). Canny pretende desarrollar un detector de bordes que cumpla tres criterios clave:

- Un bajo índice de error: Es importante que los bordes que aparecen en las imágenes no se deben perder y que no debería haber respuesta donde los bordes no existen.

- Los puntos de borde detectados deben estar bien localizados: La distancia entre los píxeles del borde encontrados por el detector y el borde real debería ser mínima.
- Solo debe haber una respuesta a un solo borde. (Solomon & Breckon , 2011)



Figura 27 Filtro Canny aplicado en una imagen

Fuente: (Solomon & Breckon , 2011)

Es prudente presentar un análisis matemático detallado y el razonamiento realizados por Canny, pero el procedimiento básico se puede resumir en los siguientes pasos:

- La imagen se suaviza utilizando un kernel gaussiano: Este paso sirve para reducir el ruido de la imagen.
- Encontrar la intensidad del borde: esto se consigue tomando el gradiente de la imagen con los operadores de Sobel en las direcciones horizontal y vertical.
- Calcular la dirección del borde.
- Digitalizar la dirección del borde: una vez que se conoce la dirección del borde, se la aproxima a una dirección de borde que no puede rastrearse en una imagen digital.
- Supresión no máxima: esto se lo realiza rastreando a lo largo del borde y suprimiendo cualquier valor de píxel que no se considere un borde. Esto dará una línea delgada en la imagen de salida.

- Histéresis: seguir a lo largo de los píxeles restantes que no se han suprimido y el umbral de la imagen para identificar los píxeles del borde. (Solomon & Breckon , 2011)

2.8. OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) es una biblioteca de software de visión abierta y software de aprendizaje automático. OpenCV fue creado para brindar una interfaz que permita crear programas y aplicaciones guiadas especialmente a la visión artificial. OpenCV cuenta con varios algoritmos usados en muchas aplicaciones de visión artificial y las más populares son aquellas que se usan para detectar y reconocer rostros, identificar objetos, clasifica, rastrear movimientos de la cámara, rastrear objetos en movimiento, seguir los movimientos oculares, etc. (OpenCV, 2018)

La ventaja de este software es que tiene interfaces basadas en C++, Python, Java y es compatible con Windows, Linux, Android y Mac OS. Además, su programación es muy amigable con el usuario lo que permite crear varios programas en diferentes ámbitos hasta permite el uso de redes neuronales, especialmente en el uso de clasificadores.

2.9. Redes neuronales

2.9.1. Neurona artificial

Unidad de procesamiento de la información, es un dispositivo simple de cálculo que ante un vector de entradas proporciona una única salida como se puede observar en la Figura 28.

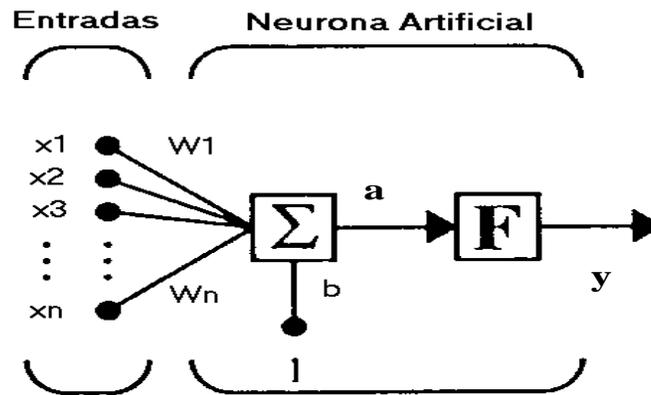


Figura 28 Esquema de una Neurona Artificial
Fuente: (Nacelle, 2009)

Los componentes de una neurona artificial son:

- Conjunto de entradas, x_n
- Pesos sinápticos, w_n
- Función de activación, $w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_n \cdot x_n = a$
- Función de transferencia, $y = F(w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_n \cdot x_n)$
- Bias o polarización

2.9.2. Redes Neuronales Artificiales (ANN)

Una Red Neuronal Artificial (ANN) es un esquema computacional que pretende emular el comportamiento biológico de las neuronas, compuesto por un gran número de elementos procesales organizados en niveles.

Debido a su estructuración y fundamentación, las ANN presentan un gran número de características similares a las del cerebro humano; lo cual hace que tengan muchas ventajas y sean ampliamente utilizadas en campos ingenieriles. Entre sus principales ventajas están:

- Aprendizaje Adaptativo: capacidad de aprendizaje de eventos basados en entrenamiento o en una experiencia inicial.
- Auto – Organización: una Red Neuronal Artificial (ANN) mediante aprendizaje puede crear una representación de la información que recibe.
- Tolerancia a fallos: la destrucción parcial de una red provoca una degradación de su estructura, sin embargo, algunas características de la red se conservan a pesar de que esta haya sufrido un gran daño.
- Operación en tiempo real: una característica importante de las ANN es que pueden realizar procesos en paralelo, lo cual les permite trabajar con múltiples procesos y datos en tiempo real.
- Fácil Inserción dentro de la tecnología existente: debido a que son sistemas adaptativos pueden incluirse en tecnología actual y mejorarla, ya que mediante la implementación de estos sistemas la nueva maquinaria ya es secuencial sino inteligente.

2.9.3. Aprendizaje Adaptativo

Neuronal artificial de aprender en base a un entrenamiento previo. Las redes neuronales son adaptables debido a la capacidad de autoajuste de los elementos procesales (neuronas) que componen el sistema, son dinámicas debido a que son capaces de estar en continuo cambio para adaptarse a nuevas condiciones.

Los pesos de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos en el proceso de aprendizaje. No es necesario un algoritmo determinado para asegurar que una red neuronal funcione, debido a que para resolver un problema una ANN puede generar sus propios pesos en las neuronas para asegurar

su aprendizaje. Es válido también mencionar que existen redes neuronales artificiales que siguen aprendiendo durante el transcurso de su vida útil incluso después de haber completado su período de entrenamiento.

Lo único que le compete a un diseñador de una red neuronal es la obtención de la arquitectura apropiada. Sin embargo, sí es necesario que desarrolle un buen algoritmo de aprendizaje que le proporcione a la red la capacidad de discriminar, mediante un entrenamiento con patrones. (Matich, 2001)

2.9.4. Componentes de una Red Neuronal Artificial (ANN)

Una ANN está compuesta por neuronas artificiales interconectadas entre sí, arregladas en tres capas (esto último está sujeto a cambios). La información ingresa por medio de la capa de entrada, pasa a través de la capa oculta (misma que puede estar integrada por varias capas) y sale por la capa de salida como se muestra en la Figura 29.

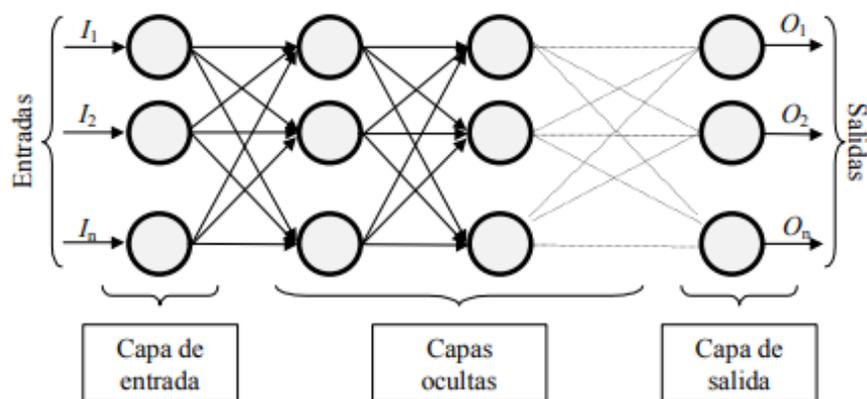


Figura 29 Esquema de una ANN

Fuente: (Matich, 2001)

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En el presente capítulo se realizará el diseño de cada uno de los subsistemas que forman parte del mecanismo omnidireccional de transporte, clasificación y control de calidad, como se ve en la Figura 30.

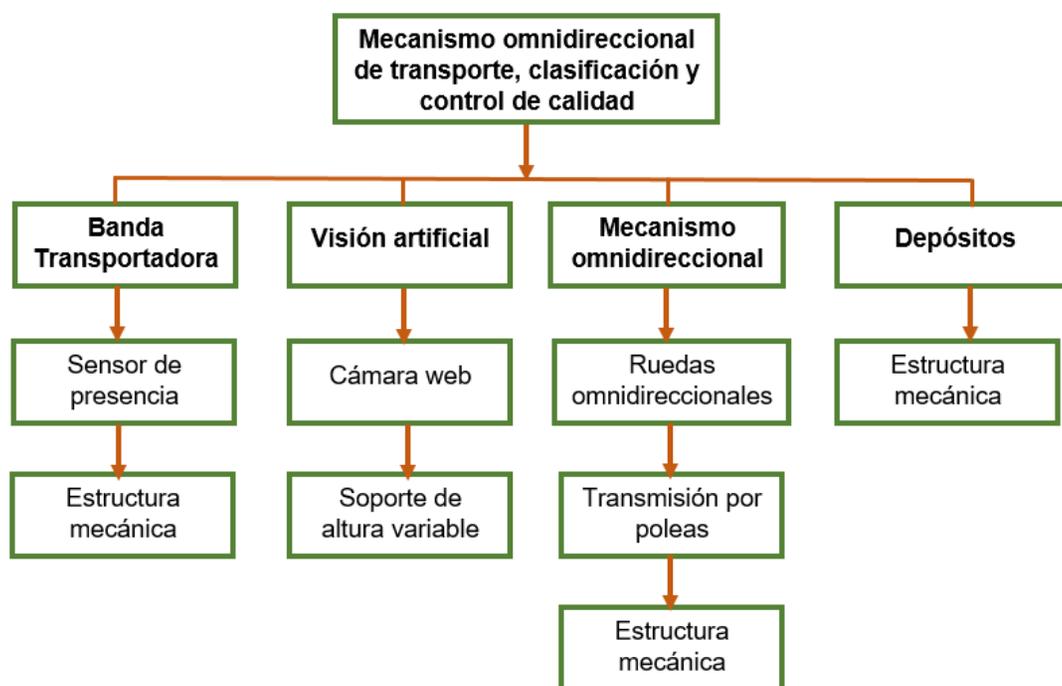


Figura 30 Diagrama de subsistemas

3.1. Diseño del mecanismo omnidireccional

3.1.1. Selección del tipo de ruedas a emplearse

Para la selección del componente ideal que será encargado de transportar y clasificar el producto en el mecanismo omnidireccional es necesario analizar los parámetros de cada rueda disponible y sus características (Ver Tabla 2).

Tabla 2*Comparación de ruedas para transporte*

Parámetro	Ruedas Cilíndricas	Ruedas Omnidireccionales	Ruedas Mecanum
Movimiento	Solo pueden rotar sobre su propia periferia. Rotaciones laterales no son posibles.	Pueden rotar en dos direcciones, una a lo largo de la periferia de la base de la llanta y la otra a lo largo de la periferia de los rodillos.	Pueden rotar en dos direcciones, una a lo largo de la periferia de la base de la llanta y la otra a lo largo de la periferia de los rodillos a un ángulo de 45°.
Ensamblaje	Fácil de montar.	Relativamente fácil.	Complejo de montar.
Uso	Movimientos en dos direcciones. Generalmente utilizadas en vehículos.	Movimientos en múltiples direcciones, con alta velocidad de avance. Generalmente utilizadas para el movimiento omnidireccional en robots y para el transporte y clasificación de productos.	Movimientos en múltiples direcciones, garantizando alta fuerza de empuje. Generalmente utilizados para el movimiento omnidireccional de robots con cualquier tipo de armazón.
Fabricación	Su fabricación es sencilla y pueden estar elaboradas de materiales metálicos, no metálicos, plásticos, etc.	Su fabricación es más compleja debido a que el material de la rueda es por lo general de plástico o de aleaciones de metal y los rodillos están hechos con materiales que posean alta tracción	Su fabricación es mucho más compleja que las omnidireccionales debido a que los rodillos están montados a un ángulo de 45 grados con

CONTINÚA 

		(compuestos de caucho) para proporcionar un alto coeficiente de fricción.	respecto al eje de la rueda. Los materiales de fabricación de la rueda y rodillos son por lo general los mismo que las ruedas omnidireccionales
Costo	Costo de fabricación bajo	Alto costo de fabricación	Alto costo de fabricación
Velocidades			
Avance (Vf)	$Vf = w.r$	$Vf = w.r.\sqrt{2}$	$Vf = w.r$
Lateral (Vr)	$Vr = -$	$Vr = w.r.\sqrt{2}$	$Vr = w.r$
Diagonal (Vd)	$Vd = -$	$Vd = w.r$	$Vd = (w.r)/\sqrt{2}$
Fuerzas			
Avance (Ff)	$Ff = 4\tau/r$	$Ff = 4\tau/(r.\sqrt{2})$	$Ff = 4\tau/r$
Lateral (Fr)	$Fr = -$	$Fr = 4\tau/(r.\sqrt{2})$	$Fr = 4\tau/r$
Diagonal (Fd)	$Fd = -$	$Fd = 2\tau/r$	$Fd = (2\tau.\sqrt{2})/r$

Fuente: (Parmar & Savant, 2014)

Teniendo que:

w , Velocidad angular

r , Radio de la periferia de la llanta

τ , Torque

Tomando en cuenta las consideraciones antes descritas en la Tabla 2 para el mecanismo omnidireccional a construirse se utilizarán ruedas omnidireccionales, las mismas que poseen características óptimas para el transporte y clasificación de

productos, debido a que en estos sistemas se necesitan altas velocidades y múltiples direcciones de movimiento, mas no elevadas fuerzas de empuje.

3.1.2. Selección de las ruedas omnidireccionales a utilizarse

Un mecanismo omnidireccional está compuesto comúnmente por ruedas omnidireccionales las mismas que le permiten el movimiento en cualquier dirección, este tipo de ruedas son de vital importancia para garantizar el óptimo funcionamiento de un sistema omnidireccional.

El presente proyecto es un mecanismo omnidireccional destinado para el transporte de piezas de prototipado rápido, por tal motivo es necesario usar ruedas omnidireccionales que no tengan ángulo de inclinación en sus rodillos, por lo que se trabajó con la marca Rotacaster, debido a que esta empresa ofrece ruedas que permiten el transporte de mercadería, ya que la mayoría de ruedas están destinadas para ser acopladas a robots omnidireccionales (Rotacaster, 2017).

Es necesario considerar una matriz de ruedas omnidireccionales las mismas que van a guiar al producto que va a ser transportado hacia su destino, por lo tanto, es necesario colocar ruedas que permitan el movimiento en el eje horizontal X así como en el eje vertical Y. Para esto se define una matriz de movimiento utilizando la ecuación 4. para definir de cuantas ruedas va a estar formada. Es necesario mencionar que el ángulo que forman los dos ejes mencionados es de 90 grados como se muestra en la Figura 31.

Dado que el ángulo es de 90 grados se despeja de la fórmula mencionada:

$$\theta = 360 / n \quad \text{Ec. 3}$$

$$n = 360 / \theta \quad \text{Ec. 4}$$

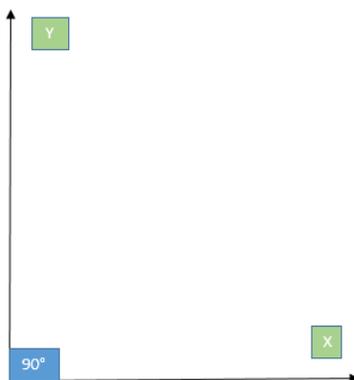


Figura 31 Diagrama de Ejes

Se reemplaza los valores y se obtiene el número de llantas a utilizarse:

$$n = 360 / 90$$

$$n = 4$$

Por tal motivo es necesario utilizar 4 puntos de sujeción para que el mecanismo pueda transportar un producto tanto en el eje X como en el Y y sus combinaciones. La matriz de movimiento a utilizarse se muestra la Figura 32.

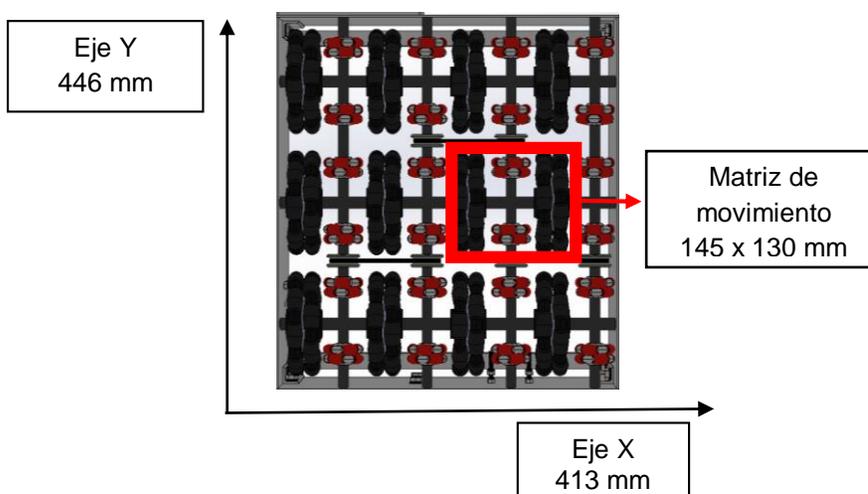


Figura 32 Matriz de movimiento a utilizarse

Es necesario considerar que para que el sistema no presente colisiones las ruedas que van a mover al eje Y así como las del eje X sean de diferentes tamaños para que los ejes en los cuales van a estar acopladas no colisionen. Por tal motivo para el presente proyecto se utilizaron las llantas omnidireccionales mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3

Ruedas omnidireccionales utilizadas

Ruedas omnidireccionales utilizadas	
Rueda omnidireccional Rotacaster 48 mm R2 – 0484 - 9001	Movimiento eje x
Rueda omnidireccional Rotacaster 125 mm R2 – 1258 – 95/N13	Movimiento eje Y

Los dos tipos de ruedas omnidireccionales utilizadas se muestran en la Figura 33.

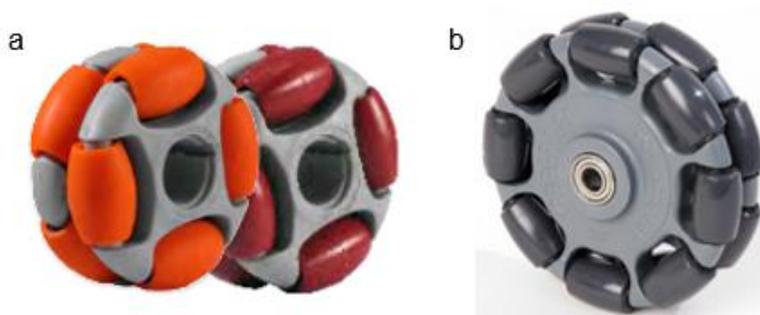


Figura 33 Ruedas omnidireccionales Rotacaster
a) 48 mm (R2 – 0484 – 9001) b) 125 mm (R2 – 1258 – 95/N13)
Fuente: (Rotacaster, 2017)

3.1.3. Diseño del eje de las ruedas omnidireccionales de 48 mm

Las ruedas omnidireccionales de 48 mm están distribuidas de 6 por cada eje, el sistema consta de 24 ruedas y 4 ejes. Se procederá a diseñar el eje más crítico, es decir

el que está acoplado al motor como se observa en la Figura 34. Esta configuración de ruedas mueve al pallete en el eje X.

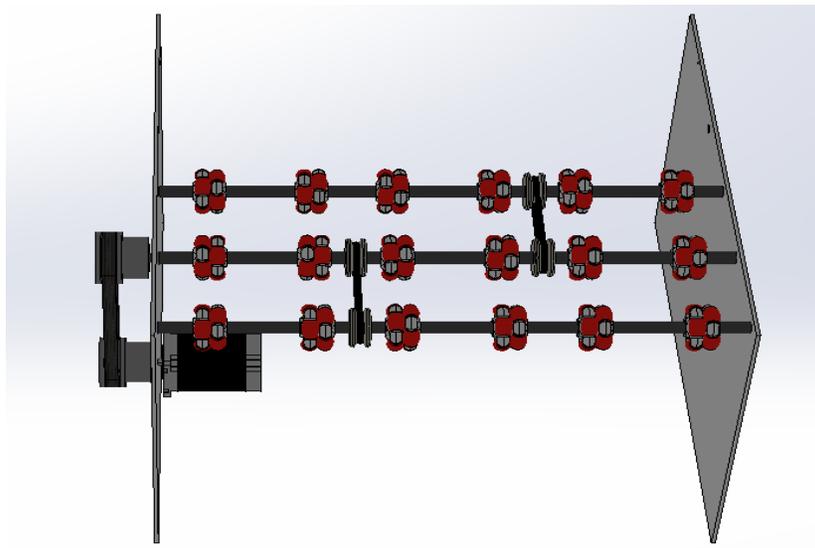


Figura 34 CAD del eje para las ruedas de 48 mm

Los pesos de cada rueda están representadas con WR y la distancia de separación entre estas se puede ver en la Figura 35.

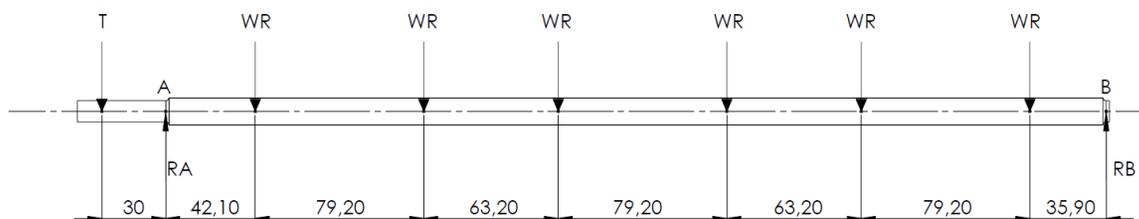


Figura 35 Diagrama de fuerzas del eje para las ruedas de 48 mm

Datos:

Peso de ruedas rojas $\rightarrow WR = 0.038kg \rightarrow 0.372 N$

Torque del motor $\rightarrow T_{pr} = 14kg \cdot cm * \frac{9.8 N}{1kg} * \frac{1m}{100cm} = 1.372 N \cdot m$

Diámetro de la polea del motor $\rightarrow D_{pm} = 0.05 N \cdot m$

Cálculo de la tensión de la polea:

$$T = \frac{T_{pr}}{\frac{D_{pm}}{2}} \quad \text{Ec. 5}$$

$$T = \frac{1.372 N \cdot m}{0.05 m / 2} = 54.88 N$$

Cálculo de las reacciones en el eje:

Este cálculo se realiza utilizando las reacciones presentes en la Figura 35 para obtener el momento máximo que se da en el eje.

$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

$$R_A + R_B = 6WR + T \quad \text{Ec. 7}$$

$$R_A + R_B = 6(0.372 N) + 54.88 N$$

$$R_A + R_B = 57.112 N$$

$$\Sigma M_A = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$T(30mm) + R_B(442mm) = WR(42.1 + 121.3 + 184.5 + 263.7 + 326.9 + 406.1)mm$$

$$30(54.88N) + 442R_B = (0.372N)(1344.6)$$

$$442R_B = 500.191 N - 1646.4 N$$

$$R_B = -2.593 N$$

$$R_A - 2.593 N = 57.112 N$$

$$R_A = 59.705 N$$

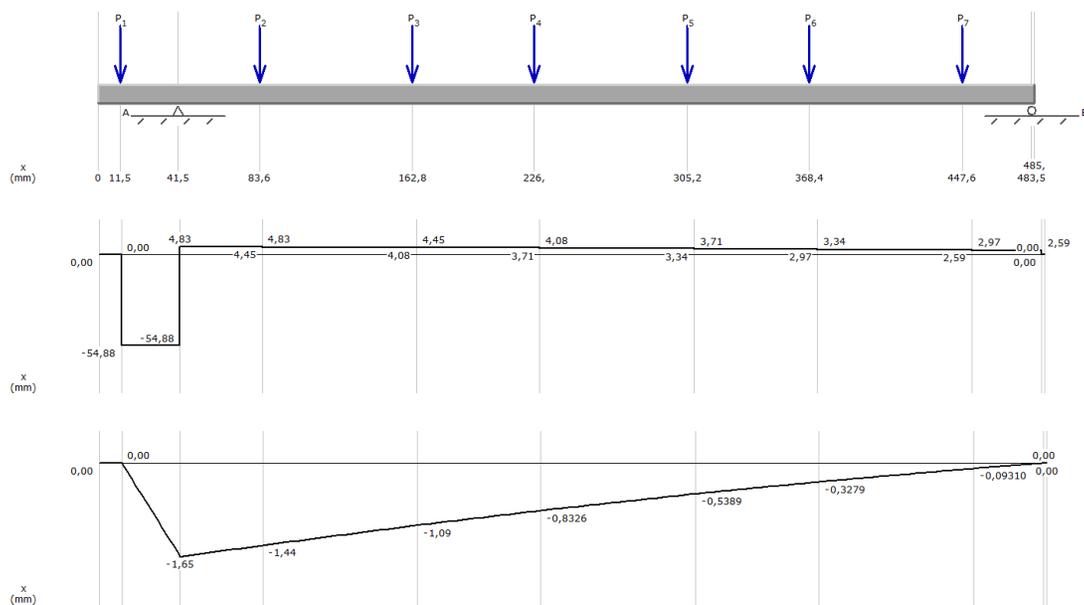


Figura 36 Diagrama V-M del eje de las ruedas de 48 mm

De la Figura 36 se tiene que el momento máximo es:

$$M_{m\acute{a}x} = 1.65 \text{ N.m}$$

Cálculo del factor de concentración de esfuerzos:

Las medidas del eje para las ruedas de 48 mm se muestran en la Figura 37.

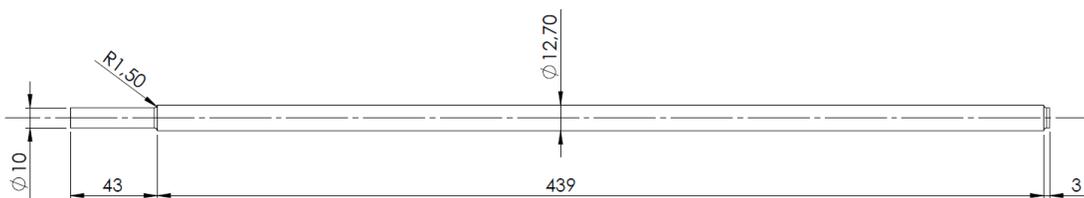


Figura 37 Medidas del eje para las ruedas de 48 mm

Para el cálculo de la concentración de esfuerzos en un eje con sección variable es necesario revisar la Figura 38.

A-22-2 Barra redonda escalonada axialmente cargada a tensión.

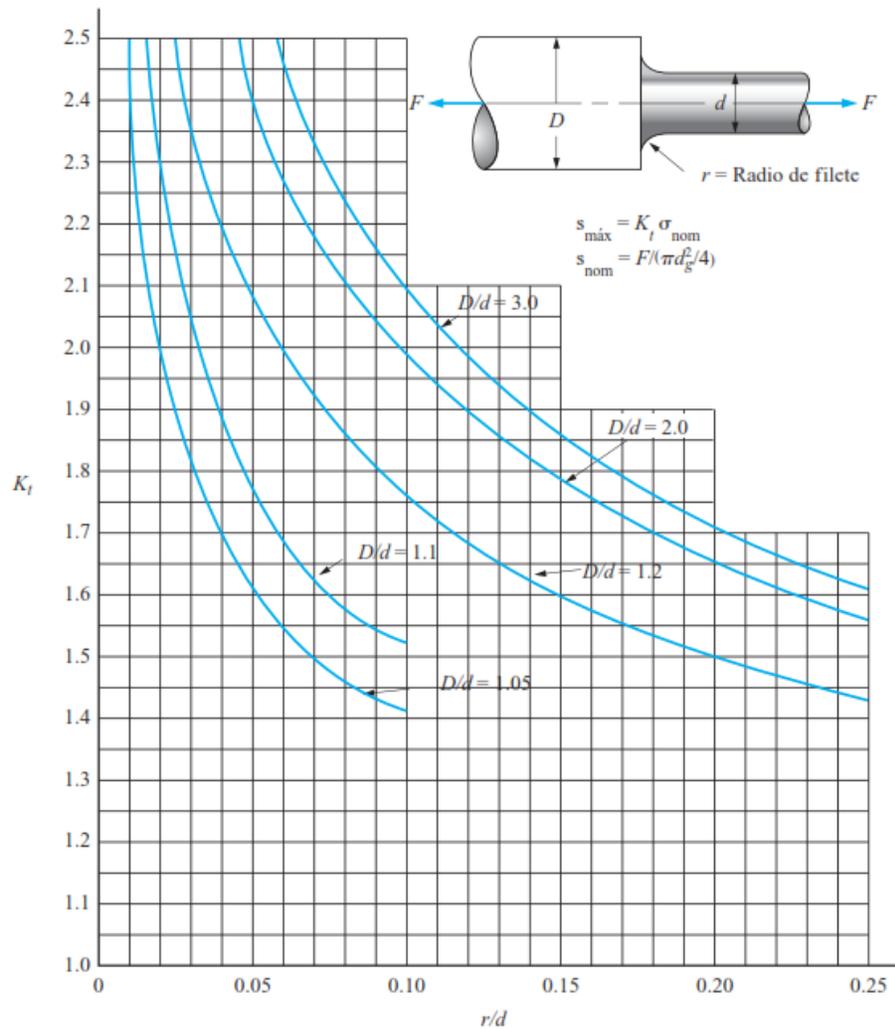


Figura 38 Factores de concentración de esfuerzos

Fuente: (Mott, 2009)

$$\frac{r}{d} = \frac{1.5}{10} = 0.15$$

$$\frac{D}{d} = \frac{12.7}{10} = 1.27$$

De la Figura 38 en donde se encuentran los factores de concentración de esfuerzos se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos para calcular k_t en el eje de las ruedas rojas

D/d	K_t
1.2	1.6
1.27	K_t
2	1.79

Fuente: (Mott, 2009)

Para obtener el factor correcto se realiza interpolación:

$$\frac{1.79 - 1.6}{2 - 1.2} = \frac{K_t - 1.6}{1.27 - 1.2}$$

$$\frac{0.19}{0.8} = \frac{K_t - 1.6}{0.07}$$

$$K_t = 1.617$$

Cálculo del esfuerzo máximo:

$$S = \frac{\pi D^3}{32}$$

Ec. 9

$$S = \frac{\pi(10 * 10^{-3} \text{ m})^3}{32}$$

$$S = 98.175 * 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{\text{máx}} * K_t}{S}$$

Ec. 10

$$\sigma = \frac{1.65 \text{ N.m} * 1.617}{98.175 * 10^{-9} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 27.179 \text{ MPa}$$

Selección del material:

Según Mott (2009) para cargas repetidas con un factor de seguridad de 8 se tiene que:

$$\sigma_d = \frac{S_y}{8} \quad \text{Ec. 11}$$

$$S_y = 27.179 \text{ MPa} * 8$$

$$S_y = 217.432 \text{ MPa}$$

En base a lo calculado se seleccionó como material el acero de transmisión 1018 cuyo $S_y = 220 \text{ MPa}$. (Mott, 2009)

3.1.4. Diseño del eje de las ruedas omnidireccionales de 125 mm

Las ruedas omnidireccionales de 125 mm están distribuidas de 4 por cada eje, el sistema consta de 12 ruedas y 3 ejes. Se procederá a diseñar el eje más crítico, es decir el que está acoplado al motor como se observa en la Figura 39. Esta configuración de ruedas mueve al pallet en el eje Y. Se sigue el mismo procedimiento de la sección 3.1.3.

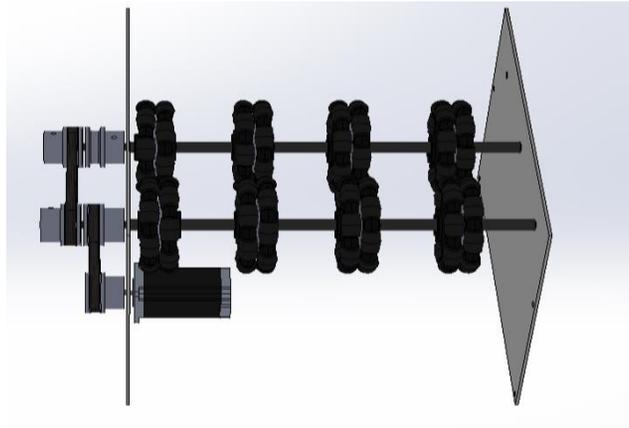


Figura 39 CAD del eje para las ruedas de 125 mm

Los pesos de cada rueda están representadas con WN y la distancia de separación entre estas se puede ver en la Figura 40.

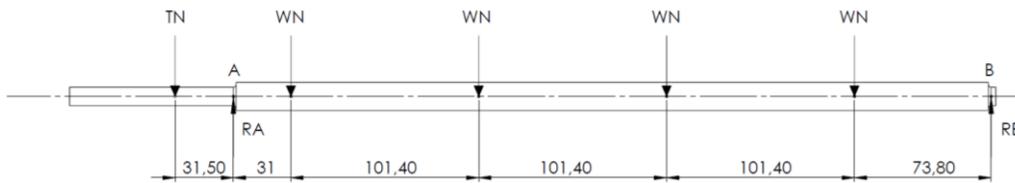


Figura 40 Diagrama de fuerzas del eje para las ruedas de 125 mm

Datos:

Peso de ruedas rojas $\rightarrow WN = 0.315kg \rightarrow 3.087 N$

Torque del motor $\rightarrow Tpn = 19 \text{ kg. cm} * \frac{9.8 N}{1kg} * \frac{1m}{100cm} = 1.862 N.m$

Diámetro de la polea del motor $\rightarrow Dpm = 0.05 N.m$

Cálculo de la tensión de la polea:

Utilizando la ecuación 5 se tiene:

$$TN = \frac{1.862N.m}{0.05m/2} = 74.48 N$$

Cálculo de las reacciones en el eje:

$$\Sigma Fy = 0$$

$$RA + RB = 4WN + TN$$

Ec. 12

$$RA + RB = 4(3.087 N) + 74.48 N$$

$$RA + RB = 86.828 N$$

$$\Sigma MA = 0$$

$$TN(31.5mm) + RB(409mm) = WN(31 + 132.4 + 233.8 + 335.2)mm$$

$$31.5(74.48 \text{ N}) + 409RB = (3.087 \text{ N})(732.4)$$

$$409RB = 2260.919 \text{ N} - 2346.12 \text{ N}$$

$$RB = -0.208 \text{ N}$$

$$RA - 0.208 = 86.828 \text{ N}$$

$$RA = 87.036 \text{ N}$$

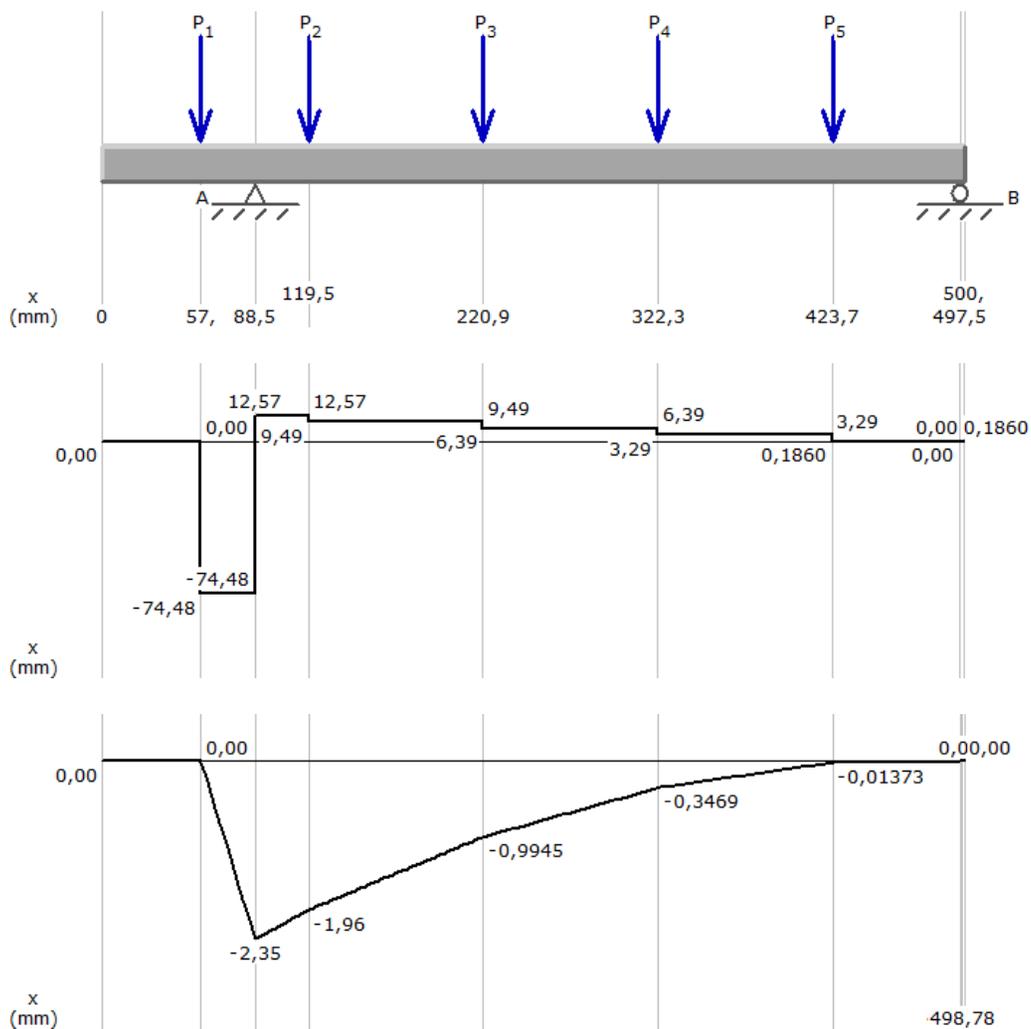


Figura 41 Diagrama V-M del eje de las ruedas de 125 mm

De la Figura 41 se tiene que el momento máximo es:

$$M_{m\acute{a}x} = 2.35N.m$$

Cálculo del factor de concentración de esfuerzos:

Las medidas del eje para las ruedas de 125 mm se muestran en la Figura 42

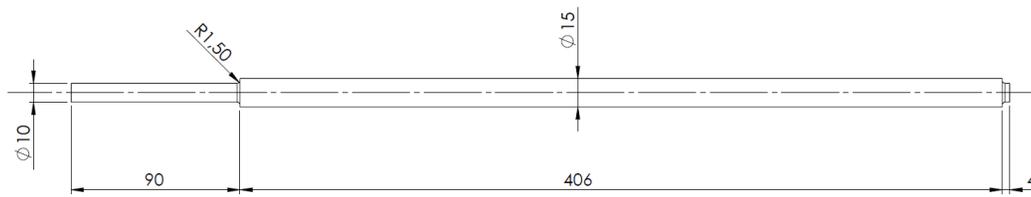


Figura 42 Medidas del eje para las ruedas de 125 mm

$$\frac{r}{d} = \frac{1.5}{10} = 0.15$$

$$\frac{D}{d} = \frac{15}{10} = 1.5$$

De la Figura 38 en donde se encuentran los factores de concentración de esfuerzos se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Datos para calcular k_t en el eje de las ruedas negras

D/d	K_t
1.2	1.6
1.5	K_t
2	1.79

Fuente: (Mott, 2009)

Para obtener el factor correcto se realiza interpolación:

$$\frac{1.79 - 1.6}{2 - 1.2} = \frac{K_t - 1.6}{1.5 - 1.2}$$

$$\frac{0.19}{0.8} = \frac{K_t - 1.6}{0.03}$$

$$K_t = 1.671$$

Cálculo del esfuerzo máximo:

Usando la ecuación 9:

$$S = \frac{\pi(10 * 10^{-3}m)^3}{32}$$

$$S = 98.175 * 10^{-9}m^3$$

Usando la ecuación 10:

$$\sigma = \frac{2.35N.m * 1.671}{98.175 * 10^{-9}m^3}$$

$$\sigma = 39.998MPa$$

Selección del material:

De la ecuación 11 se tiene:

$$S_y = 39.998MPa * 8$$

$$S_y = 319.984MPa$$

En base a lo calculado se seleccionó como material el acero de transmisión 1018 recocido cuyo $S_y = 370MPa$ (DIPAC, 2018)

3.1.5. Diseño del eje de la banda transportadora

Las banda transportadora consta de dos ejes, se procederá a diseñar el eje más crítico, es decir el que está acoplado al motor como se observa en la Figura 43.

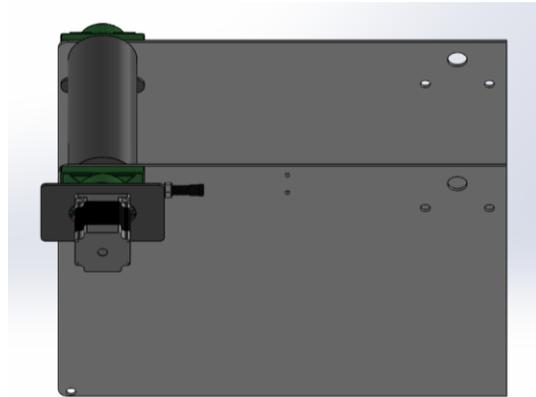


Figura 43 CAD del eje de la banda transportadora

El peso de la banda junto al pallet está representada con WC, el mismo que es una carga distribuida y su longitud se muestra en la Figura 44. La carga WC se toma como máximo de 1 kg ya que ese es el peso aproximado del pallet, la banda y la pieza de prototipado 3D a transportar. Se sigue el mismo procedimiento de la sección 3.1.3.

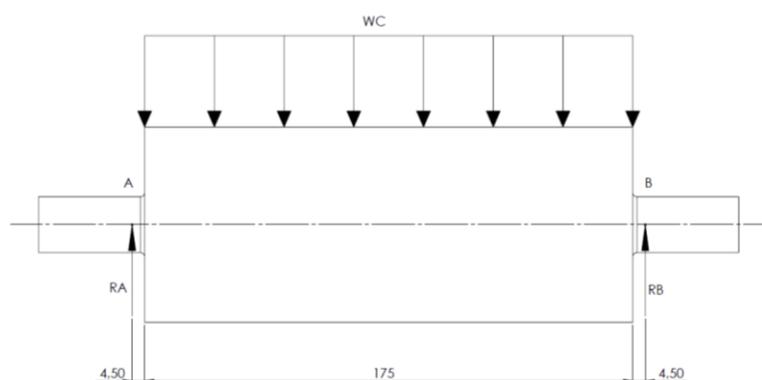


Figura 44 Diagrama de fuerzas de la banda transportadora

Datos:

Peso máx. sobre la banda $\rightarrow WC = 1kg \rightarrow 9.81 N$

Carga distribuida:

$$WC = \frac{9.81N}{0.175m}$$

$$WC = 56.057N/m$$

Cálculo de las reacciones en el eje:

Este cálculo se realiza utilizando las reacciones presentes en la Figura 44 para obtener el momento máximo que se da en el eje.

$$\Sigma Fy = 0$$

$$RA + RB = WC$$

Ec. 13

$$RA + RB = 9.81 N$$

$$\Sigma MA = 0$$

$$RB(184mm) = WC(92mm)$$

$$184RB = (9.81 N)(92)$$

$$RB = \frac{(9.81N)(92)}{184}$$

$$RB = 4.905 N$$

$$RA + 4.905 N = 9.81 N$$

$$RA = 4.905 N$$

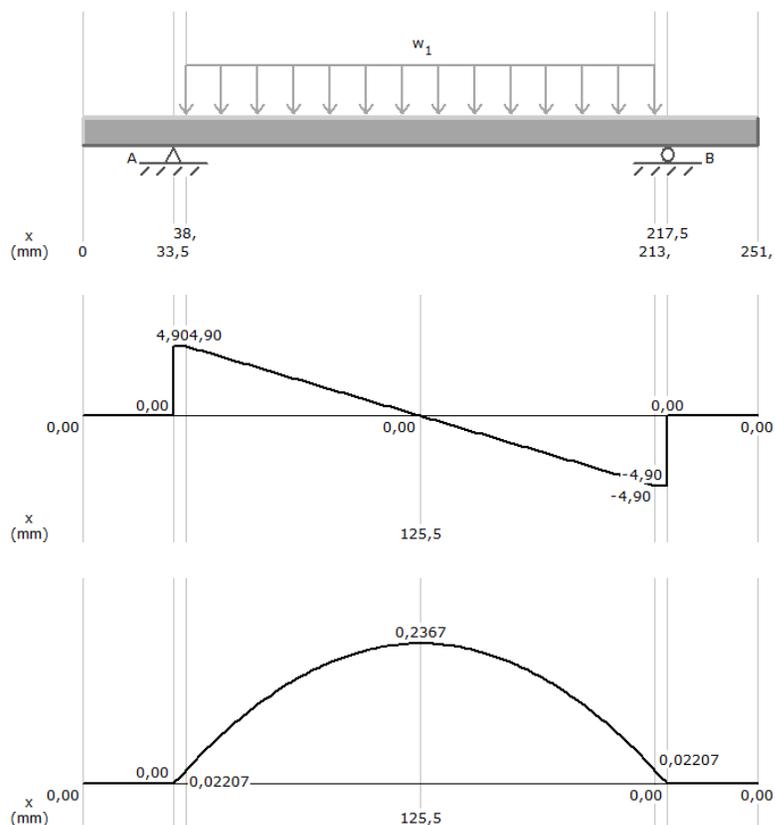


Figura 45 Diagrama V-M del eje de la banda transportadora

De la Figura 45 se tiene que el momento máximo es:

$$M_{m\acute{a}x} = 0.2367 \text{ N.m}$$

Cálculo del factor de concentración de esfuerzos:

Las medidas del eje para la banda transportadora se muestran en la Figura 46.

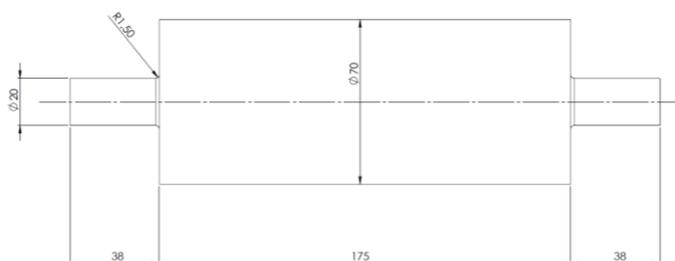


Figura 46 Medidas del eje de la banda transportadora

$$\frac{r}{d} = \frac{1.5}{20} = 0.075 \qquad \frac{D}{d} = \frac{70}{20} = 3.5$$

De la Figura 38 en donde se encuentran los factores de concentración de esfuerzos se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Datos para calcular k_t en el eje de la banda transportadora

D/d	K_t
2	2.125
3	2.26
3.5	K_t

Fuente: (Mott, 2009)

Para obtener el factor correcto se realiza interpolación:

$$\frac{1.26 - 2.125}{3 - 2} = \frac{K_t - 2.125}{3.5 - 2}$$

$$\frac{0.135}{1} = \frac{K_t - 2.125}{1.5}$$

$$K_t = 2.328$$

Cálculo del esfuerzo máximo:

Usando la ecuación 9:

$$S = \frac{\pi(20 * 10^{-3}m)^3}{32}$$

$$S = 785.398 * 10^{-9} m^3$$

Usando la ecuación 10:

$$\sigma = \frac{0.2367N.m * 2.328}{785.398 * 10^{-9}m^3}$$

$$\sigma = 0.702 MPa$$

Selección del material:

De la ecuación 11 se tiene:

$$S_y = 0.702MPa * 8$$

$$S_y = 5.616 MPa$$

En base a lo calculado se seleccionó como material el acero de transmisión 1018 cuyo $S_y = 220 MPa$ (Mott, 2009)

3.1.6. Selección de los motores

Es claro mencionar que se utilizaron motores paso a paso, debido a que su control de velocidad y de posición es mucho más fácil y preciso que con cualquier motor de corriente continua convencional. Para poder asegurar que el motor que se seleccione pueda mover los ejes que forman parte del mecanismo es necesario definir sus pesos para calcular el torque necesario del motor como se observa en la Figura 47.



Figura 47 Peso de ruedas omnidireccionales y sus ejes

Una vez pesados los elementos que forman parte de cada eje de la máquina es necesario definir su peso total, el peso que cada motor va a mover, tanto para asegurar un movimiento en el eje X (ruedas omnidireccionales 48 mm) así como en el eje Y (ruedas omnidireccionales 125 mm) como se observa en la Figura 48.



Figura 48 Ejes X e Y armados con sus ruedas omnidireccionales

En la Tabla 7 se muestran los datos obtenidos del pesaje anteriormente realizado.

Tabla 7

Pesos de ejes con ruedas

Pesos Ejes – Mecanismo Omnidireccional		
Nombre	Peso Individual	Peso Total
Ruedas Omnidireccionales (48 mm) y Eje	0.713 kg	2.852 kg
Ruedas Omnidireccionales (125 mm) y Eje	1.704 kg	5.112 kg

Como se puede observar en la Tabla 7 se tiene que el motor de las ruedas omnidireccionales de 48 mm debe ser capaz de mover 2.852 kg como mínimo, así como el motor de las ruedas omnidireccionales de 125 mm debe ser capaz de mover 5.112 kg como mínimo.

Para la banda transportadora se seleccionó un motor NEMA 23 con un torque de 9 kg.cm debido a que la carga que maneja es baja como se ve en la sección 3.1.5.

Como datos para el cálculo del torque se tiene:

ϕ_{ER} , Diámetro de la polea, ruedas omnidireccionales (48 mm)

ϕ_{EN} , Diámetro de la polea, ruedas omnidireccionales (125 mm)

W_{ER} , Peso total eje - ruedas omnidireccionales (48 mm)

W_{EN} , Peso total eje - ruedas omnidireccionales (125 mm)

T_{ER} , Torque motor - ruedas omnidireccionales (48 mm)

T_{EN} , Torque motor - ruedas omnidireccionales (125 mm)

$$\phi_{ER} = \phi_{EN} = 5 \text{ cm}$$

Se calcula el torque de los motores:

$$T_{ER} = \frac{\phi_{ER}}{2} \times W_{ER} \quad \text{Ec. 14}$$

Al calcular el torque con la ecuación 14 se obtiene el valor mínimo que el motor necesita para mover al sistema, pero como en condiciones reales siempre existen agentes externos que pueden afectar su funcionamiento es necesario asegurar que el motor pueda mover al sistema por tal motivo se seleccionó un factor de seguridad de $n=1.4$.

$$W_{ER} = 2.852 \text{ kg}$$

$$T_{ER} = \frac{5 \text{ cm}}{2} \times (2.852 \text{ kg}) \times 1.4$$

$$T_{ER} = 9.982 \text{ kg.cm}$$

El mismo factor de seguridad se utiliza para el cálculo del torque del motor de las ruedas omnidireccionales (125 mm):

$$WEN = 5.112 \text{ kg}$$

$$TEN = \frac{5 \text{ cm}}{2} \times (5.112 \text{ kg}) \times 1.4$$

$$TEN = 17.892 \text{ Kg.cm}$$

Una vez calculados los torques de los motores necesarios para mover el mecanismo es momento de seleccionar los motores, para dicha selección es necesario mencionar que motores con el torque exacto calculado no existen en el mercado, pero siempre se buscan motores con un torque mayor al calculado para asegurar su funcionamiento y que no fallen por sobrecarga:

Se tiene que el torque necesario para mover al eje X es de:

$$TER = 9.982 \text{ kg.cm}$$

En el mercado existen una gran variedad de motores paso a paso, de los cuales los de la serie NEMA 23 ofrecen mayores prestaciones en cuanto a transmitir carga se refieren, como el torque necesario es de 9.982 kg.cm se hace la selección del motor: motor a pasos NEMA 23 de 14 kg.cm.

Para el eje Y del movimiento omnidireccional, se requiere un torque de:

$$TEN = 17.892 \text{ kg.cm}$$

Para este eje se hace la selección del siguiente motor: motor a pasos NEMA 23 de 19 Kg.cm

3.1.7. Diseño del soporte del motor NEMA 23 de 9 kg.cm

El soporte del motor NEMA 23 (9 kg.cm), tiene una geometría compleja como se muestra en la Figura 49, ya que así se asegura que el motor este bien sujetado.

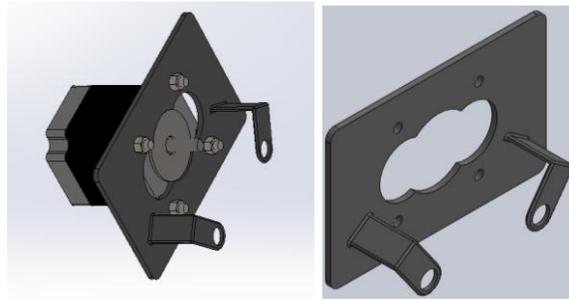


Figura 49 Soporte motor NEMA 23 (9 kg.cm)

El análisis de esta pieza se realizó en un software CAE debido a que su configuración es muy compleja. Como se ve en la Figura 50 se crea un estudio estático y se colocan las cargas a las cuales la pieza va a estar sometida. Debido a que el motor permite ser ajustado con 4 tornillos la placa presenta 4 orificios para sujetar al motor, por tal motivo cada orificio va a tener una carga del peso del motor dividido para 4.

WM , Peso del motor

$WM4$, Peso del motor en cada apoyo

$$WM = 0.275 \text{ kg}$$

$$WM4 = 2.695 \text{ N}$$

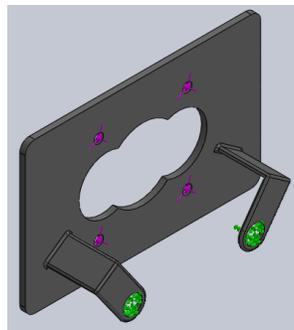


Figura 50 Soportes y cargas en la placa

El diseño del soporte está ligado a encontrar el material con el cual fabricarlo, para lo cual en la simulación se selecciona el material el cual se va a utilizar y así verificar su

esfuerzo y comprobar si funciona bajo las condiciones de carga establecidas. Se selecciona el material AISI 304, debido a que es comercial y su distribuidor es DIPAC en Ecuador.

Una vez ejecutado el estudio de análisis estático de la pieza analizada se tiene el resultado que está en la Figura 51.

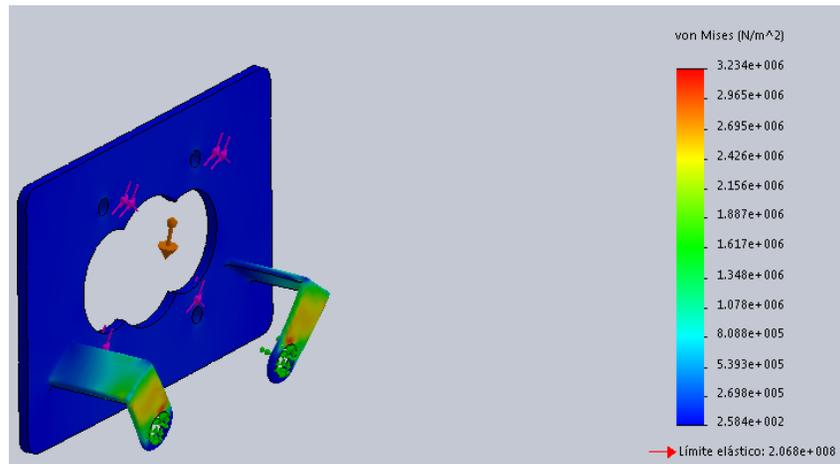


Figura 51 Análisis estático

Entre los datos proporcionados por el software se tienen los siguientes:

- Masa: 0.213429 kg
- Volumen: 2.66787e – 005 m³
- Densidad: 8000 kg/m³
- Peso: 2.09161 N
- Límite elástico: 2.06807e + 008 N/m²
- Límite de tracción: 5.17017e + 008 N/m²
- Módulo elástico: 1.9e + 011 N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0.29
- Densidad: 8000 kg/m³

- Módulo cortante: $7.5e + 010 \text{ N/m}^2$
- Coeficiente de dilatación térmica: $1.8e - 005 /\text{Kelvin}$

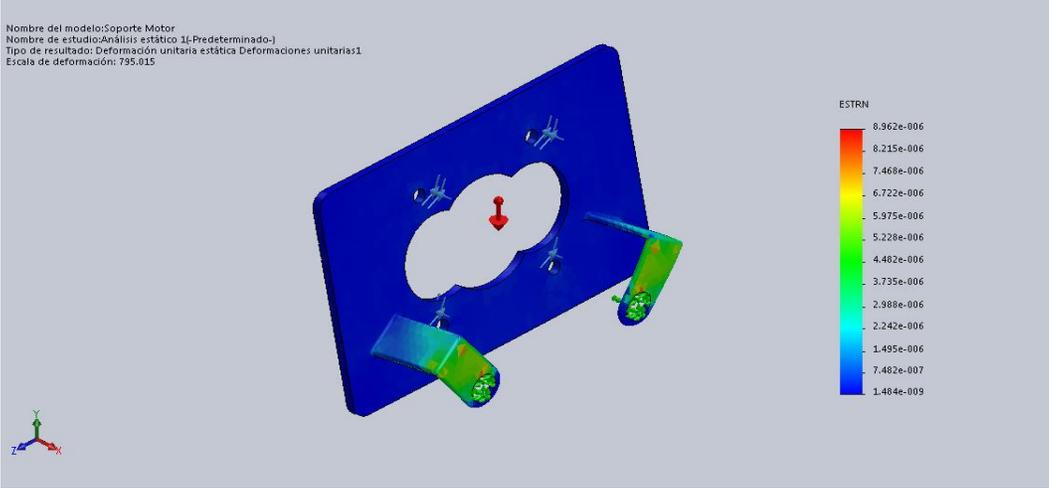
En el informe entregado por el software CAD se obtiene el valor que es el más importante, la deformación unitaria como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Informe de deformaciones unitarias

Nombre:	Tipo:	Mín:	Máx:
Deformación Unitaria	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.484e-009 mm Elemento: 1101	8.962e-006 mm Elemento: 1856

Nombre del modelo: Soporte Motor
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
 Escala de deformación: 795.015



Soporte Motor-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

De acuerdo al informe entregado por el software CAE el valor máximo de deformación es de 8.962 umm, dicho valor es excesivamente pequeño por lo tanto el material seleccionado es apropiado.

3.1.8. Diseño de los sistemas de transmisión

El mecanismo omnidireccional consta de tres sistemas de transmisión como se muestra en la Figura 52:

- Sistema 1: Motor (9 kg.cm) – Banda transportadora
- Sistema 2: Motor (14 kg.cm) – Movimiento eje X
- Sistema 3: Motor (19 kg.cm) – Movimiento eje Y

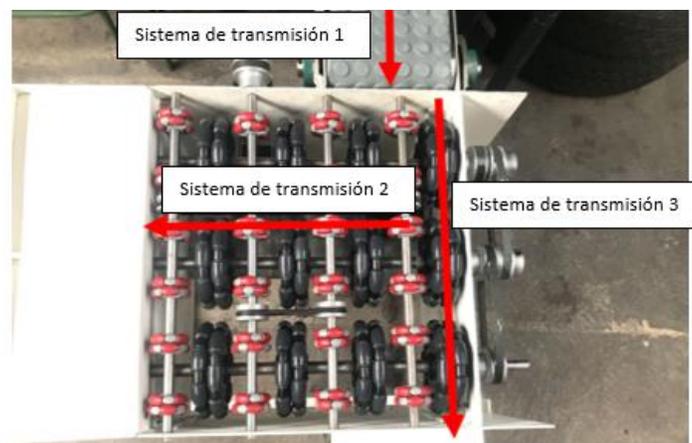


Figura 52 Sistemas de transmisión del mecanismo omnidireccional

3.1.9. Selección de las poleas del sistema de transmisión

Para seleccionar el tipo de polea se necesita saber que correa puede transmitir la potencia del motor con el que se está trabajando para lo que se necesitan los siguientes datos:

$$\text{velocidad del motor} = w_m = 150rpm$$

$$\text{Potencia del motor de } 19 \text{ kg.cm} = P_1 = 96W$$

$$\text{Potencia del motor de } 14 \text{ kg.cm} = P_2 = 72W$$

Se procede a calcular la potencia efectiva y se la compara con la velocidad de la polea conducida que debe ser la misma de la polea conductora.

CLASE DE TRABAJO	EJEMPLOS DE MÁQUINAS ACCIONADAS	TIPOS DE MÁQUINAS MOTRICES					
		Motores de Corriente Alterna con par de Arranque Normal			Motores de Corriente Alterna con par de Arranque Elevado		
		Horas de Servicio Diarias			Horas de Servicio Diarias		
		Menos de 10	De 10 a 16	Más de 16	Menos de 10	De 10 a 16	Más de 16
Ligero	Agitadores para líquidos. Aspiradores. Bombas y compresores centrifugos. Transportadores de cinta para carga ligera. Ventiladores y bombas hasta 7,5 Kw.	1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3
Mediano	Amasadoras. Cizallas y prensas. Cribas rotativas y vibrantes. Generadores y excitatrices. Máquinas herramientas. Maquinaria para artes gráficas. Maquinaria para lavanderías. Transportadores de cinta para carga pesada. Ventiladores y bombas a partir de 7.5 Kw.	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4

Figura 53 Factores de servicio

Fuente: (Rexon, 2010)

De la Figura 53 se tiene que se va a trabajar con un factor de servicio $F_s = 1$.

Calculando la potencia efectiva para las bandas de las poleas de los dos motores:

$$P_{e1} = P_1 \cdot F_s$$

Ec. 15

$$P_{e1} = 96W. (1)$$

$$P_{e1} = 96W$$

$$P_{e2} = 72W. (1)$$

$$P_{e1} = 72W$$

En base a la Figura 54 se hace una relación entre la potencia efectiva y la velocidad de la polea conducida y se tiene que la intersección entre estos dos valores se encuentra dentro del área de las correas tipo B. Entonces se emplearán bandas en B tipo V, ya que estas evitan que haya patinaje entre las poleas conducida y conductora durante el movimiento del motor asegurando una buena transmisión de movimiento.

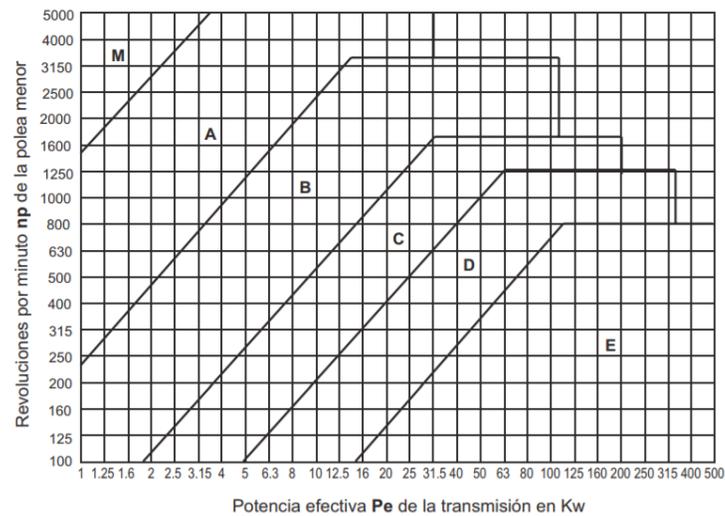


Figura 54 Gráfica de la selección de correas

Fuente: (Rexon, 2010)

Al usar las bandas tipo B y por disponibilidad en el mercado se seleccionan las poleas de 50 mm de diámetro como se muestra en la Figura 55, ya que estas tienen el canal adecuado para el ancho del tipo de banda seleccionada, las mismas que se encargarán de transmitir el movimiento en los sistemas de transmisión 2 y 3 que se observan en la Figura 52.



Figura 55 Polea

Al tener la polea conductora es necesario definir la polea que va a ser conducida como se muestra en la Figura 56.



Figura 56 Poleas conductora y conducida

Debido a que se necesita que la velocidad de la polea conductora sea la misma que la de la polea conducida la transmisión en el sistema es directa como se muestra en la sección 3.1.8. Para el cálculo en los sistemas de transmisión con poleas se tiene la ecuación 16.

$$w_1 \cdot r_1 = w_2 \cdot r_2$$

Ec. 16

Donde:

$w_1 =$ velocidad angular de la polea conductora

$r_1 =$ radio de la polea conductora

$w_2 =$ velocidad angular de la polea conducida

$r_2 =$ radio de la polea conducida

Como las velocidades deben ser las mismas se tiene que $w_1 = w_2$, reemplazando en la ecuación 15 se tiene que:

$$w_1 \cdot r_1 = w_1 \cdot r_2$$

$$r_1 = r_2$$

Por lo tanto, la polea conducida tendrá la misma dimensión que la polea conductora. El mismo principio es aplicado en el movimiento dentro del sistema de transmisión 2, donde las poleas deben tener un diámetro menor a las ruedas

omnidireccionales de 48 mm para que no haya interrupción en el movimiento del pallet por el sistema (Figura 57), entonces se utilizaron poleas de 40 mm de diámetro.

La velocidad angular de cada motor es la misma (150 rpm), lo único que los diferencia son sus valores de torque como se muestra en la sección 3.1.6.

Para conectar las poleas del sistema de transmisión es necesario utilizar bandas en V tipo B dentadas como se muestra en la Figura 58, ya que al estar conectadas al motor no debe haber patinaje en la transmisión. Para el movimiento del sistema de transmisión 3 se utilizaron bandas planas en V tipo B (Figura 59) y en el interior del sistema de transmisión 2 se utilizaron bandas redondas ya que estas son utilizadas al trabajar con ejes múltiples como se observa en la Figura 57.

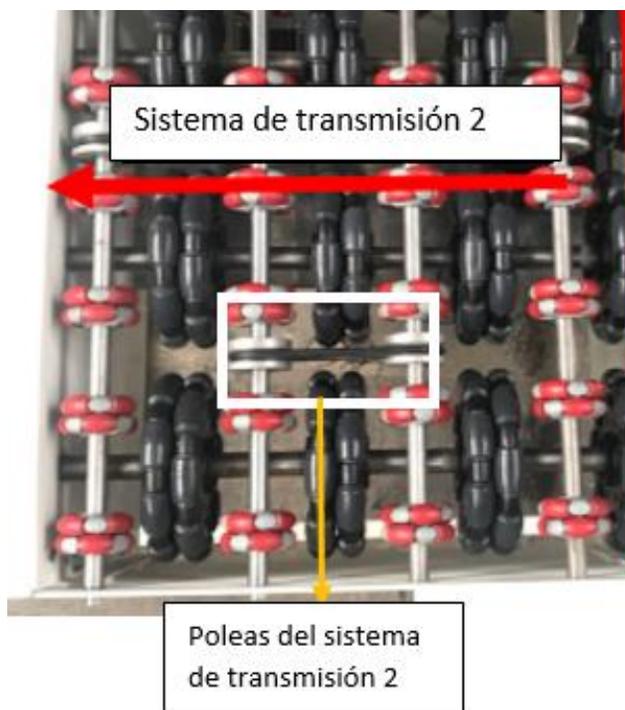


Figura 57 Sistemas de transmisión del mecanismo omnidireccional



Figura 58 Sistema de transmisión de Motor (14 kg.cm) – ruedas 48 mm



Figura 59 Sistema de transmisión de Motor (19 kg.cm) – ruedas 125 mm

3.1.10. Diseño del soporte de la cámara

El soporte debe ser capaz de variar su altura para poder ajustar el enfoque de la cámara con respecto a la región de interés donde se va a trabajar, dicha variación de altura es de 50 mm como se muestra en la Figura 60.



Figura 60 Soporte de la cámara con altura variable

La mínima altura de la cámara con respecto al pallet es de 150 mm y la máxima es de 195 mm. La cámara ubicada en su respectivo soporte se muestra en la Figura 61.



Figura 61 Soporte de la cámara con altura variable

Es necesario definir la región de interés que cubre la cámara en el pallet, con las alturas mencionadas anteriormente se obtuvieron las regiones de interés mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9

Regiones de interés sobre el pallet

Regiones de interés sobre el pallet		
Altura de la cámara con respecto al pallet	Dimensiones de la región de interés	
	Largo	Ancho
19.5 cm	14.5 cm	18.5 cm
17 cm	10 cm	12.5 cm
15 cm	9 cm	11 cm

El pallet tiene una dimensión de 15 x 15 cm, ya que con estas dimensiones se cubre la matriz de movimiento del sistema, de la Tabla 9 se puede observar que a una

altura de 15 cm cubre muy poco espacio del pallet y a 19.5 cm se sobrepasa; por tal motivo la altura ideal de la cámara con respecto al pallet es de 17 cm como se observa en la Figura 62.

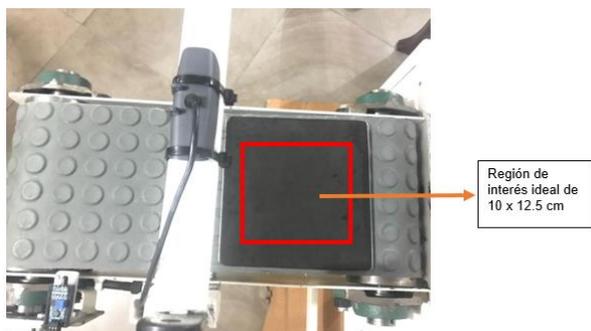


Figura 62 Región de interés ideal

3.2. Construcción del mecanismo omnidireccional

El ensamble final de la máquina en un software CAD se muestra en la Figura 63.



Figura 63 Ensamble de la máquina en un software CAD

La estructura mecánica del sistema fue fabricada con planchas de tol de 3 mm, la misma que consta de un soporte de 4 patas y de tres depósitos.

La construcción del mecanismo omnidireccional es completamente mecánica en la cual se siguieron estos pasos:

1. Se construyen las paredes que sostendrán a los ejes con las ruedas omnidireccionales como se ve en la Figura 64.



Figura 64 Paredes matriz de ruedas omnidireccionales

2. Se mecanizan los ejes que sostendrán a las ruedas omnidireccionales en el mecanismo (ver Figura 65).



Figura 65 Ejes del mecanismo omnidireccional

3. Se colocan los depósitos que recibirán las piezas en la máquina después de haber sido clasificadas como se observa en la Figura 66.

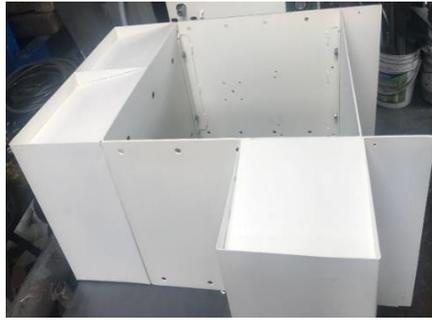


Figura 66 Depósitos

4. Se construyen las patas que soportarán el peso de la máquina (ver Figura 67).



Figura 67 Base del mecanismo

5. Se define el tipo de banda a utilizarse, la cual es una B.I.T. (Banda Industrial Técnica) tipo botón y se realiza la unión que en este caso es a traslape como se muestra en la Figura 68.



Figura 68 Banda a utilizarse

6. Se construye la base de la banda transportadora (ver Figura 69).



Figura 69 Base de la banda transportadora

7. Se ensambla la banda a su base como se observa en la Figura 70.



Figura 70 Ensamble de la banda transportadora

8. Se colocan las ruedas omnidireccionales en sus respectivos ejes dentro del mecanismo como se muestra en la Figura 71.



Figura 71 Ensamble de ruedas omnidireccionales

9. Como se observa en la Figura 72 se construye el soporte para el motor NEMA 23 de 9 kg.cm.



Figura 72 Soporte motor NEMA 23 (9 kg.cm)

10. Se procede con la construcción del soporte para la cámara web como se observa en la Figura 73.



Figura 73 Soporte de cámara web

11. Se realiza el ensamble de todos los componentes que conforman la banda transportadora (ver Figura 74).



Figura 74 Ensamble los componentes de la banda transportadora

12. Es necesario utilizar poleas para poder realizar los acoplos de los motores hacia los ejes, ya que se va a realizar una transmisión directa para el movimiento del sistema.
13. Para la transmisión del movimiento se utilizan bandas acopladas a poleas para conectar los motores hacia los ejes del mecanismo omnidireccional como se muestra en la Figura 75.

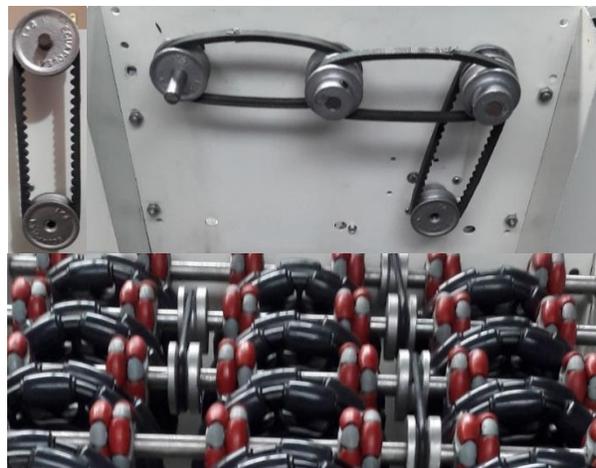


Figura 75 Sistemas de transmisión del mecanismo

14. El ensamble final de la máquina se muestra en la Figura 76.



Figura 76 Ensamble final del mecanismo omnidireccional

3.3. Diseño del circuito electrónico

En esta sección se realizará la selección de los componentes que integran el circuito electrónico del sistema como drivers, tarjeta de control y fuente de alimentación; además se mostrará su implementación en el mismo. También se muestra el diagrama esquemático de las conexiones del circuito implementado.

3.3.1. Selección de los drivers

Los motores a pasos utilizados para la implementación del mecanismo omnidireccional y su ubicación dentro del sistema se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Motores del mecanismo omnidireccional

Motores del mecanismo omnidireccional	
Motor	Ubicación
Motor a Pasos NEMA 23 (9 kg.cm)	Banda Transportadora
Motor a Pasos NEMA 23 (14 kg.cm)	Accionamiento llantas Omnidireccionales 48 mm
Motor a pasos NEMA 23 (19 kg.cm)	Accionamiento llantas Omnidireccionales 125 mm

Se utilizaron distintos tipos de motores debido a que cada uno utiliza diferentes cargas de accionamiento por tal motivo es claro mencionar que cada uno debe manejar diferentes tipos de potencias. Por tal motivo cada motor utiliza un driver que le suministre la corriente necesaria para poder mover la carga que maneja el sistema, los mismos que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11*Drivers para los motores a pasos*

Drivers para los motores a pasos	
Motor	Driver
Motor a Pasos NEMA 23 (9 kg.cm)	BL - TB6560 - V1.2 – 4.5 A
Motor a Pasos NEMA 23 (14 kg.cm)	BL – TB6560 - V1.2 – 4.5 A
Motor a pasos NEMA 23 (19 kg.cm)	BL - TB6600 - V1.2 - 5 A

En la Figura 77 y Figura 78 se muestra la distribución de pines de los drivers utilizados.



Figura 77 Distribución de pines Driver BL - TB6560 - V1.2 – 4.5A
Fuente: (DIY Projects, 2018)

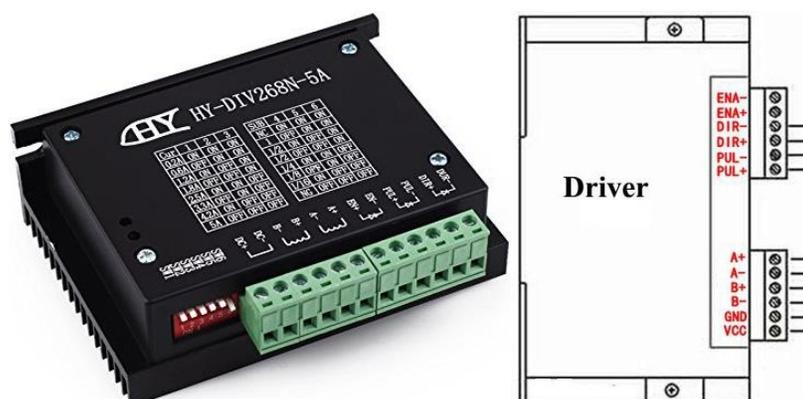


Figura 78 Distribución de pines Driver BL - TB6600 - V1.2 - 5A
Fuente: (Electronilab, 2018)

La principal diferencia entre los drivers mencionados es la capacidad de corriente que suministran al motor a pasos, las mismas que se especifican en la Tabla 12.

Tabla 12

Comparación de los drivers

Drivers para los motores a pasos		
Driver	Voltaje	Amperaje
BL - TB6560 - V1.2 - 4.5 A	8 ~ 42V DC	2.8 A a 4.5 A
BL - TB6600 - V1.2 - 4.5 A	12 ~ 42V DC	0.2 A a 5 A

3.3.2. Selección de la tarjeta de control

El mecanismo omnidireccional está compuesto por 3 motores a pasos los mismos que para su funcionamiento necesitan 4 señales:

- Alimentación activación de señal 5 voltios
- Alimentación funcionamiento 24 voltios 15 amperios
- Pulsos
- Pasos

La tarjeta de control a seleccionarse debe ser capaz de brindar las 3 señales, excepto la alimentación de 24 voltios, ya que esta señal proviene de la fuente de alimentación. La señal de alimentación de 5 voltios es general para el circuito, pero las señales de pulso y pasos son para cada motor, estas señales son para 6 pulsos y 6 pasos.

La tarjeta de control seleccionada es Arduino, debido a su facilidad de manejo y sus altas prestaciones a lo que control de circuitos electrónicos se refiere. Arduino dispone de varios tipos de tarjetas entre la más comerciales se tienen Nano, Uno y Mega; en el presente proyecto se utilizó la tarjeta Arduino Uno ya que a diferencia de la Nano su

manejo e instalación son más sencillos y una Mega es más costosa y posee más pines de los que se necesita.

Los pines necesarios de la tarjeta Arduino Uno para el control de circuito se muestran en la Figura 79.

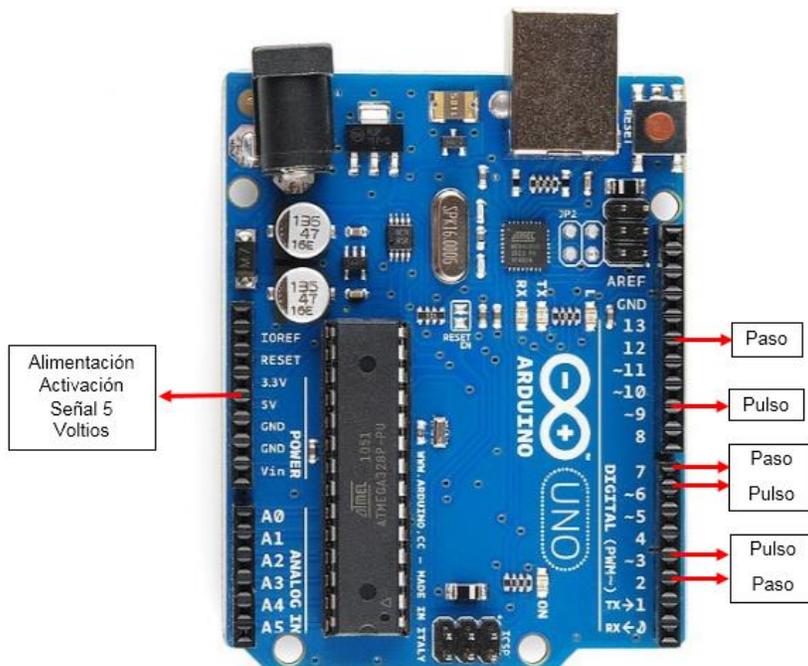


Figura 79 Pines utilizados de la tarjeta de control Arduino Uno

3.3.3. Selección de la fuente de alimentación

La fuente de alimentación del sistema debe proporcionar 24 voltios y 15 amperios para el correcto funcionamiento de los motores a pasos. En el mercado existen muchos tipos de fuentes que proporcionan dichos valores de voltaje y corriente en una sola salida, pero existe una fuente que posee tres salidas que son las que se necesitan para alimentar a los motores como se muestra en la Figura 80, sus características técnicas se muestran en la Tabla 13.

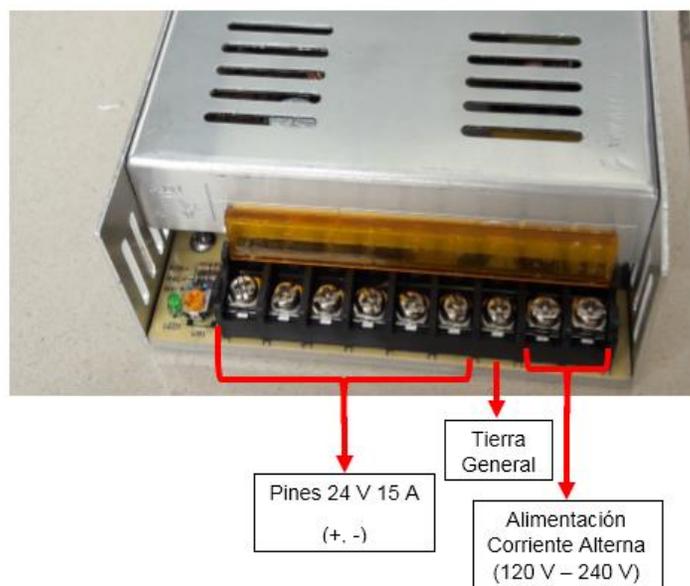


Figura 80 Pines de la fuente de alimentación 24V 15A (3DPS2415)

Tabla 13

Características técnicas de la fuente de alimentación

Características técnicas de la fuente de alimentación	
Característica	Especificación
Número de serie	3DPS2415
Alimentación	120 – 240 voltios
Potencia	350 W
Número de salidas	3 de 24 voltios – 15 amperios
Grado de protección	IP20

3.4. Construcción del circuito electrónico

Para la construcción del circuito eléctrico es necesario comprobar el perfecto funcionamiento de los drivers y de los motores a pasos a utilizarse para asegurar que no presenten fallas al momento de arrancarlos. El diagrama del circuito electrónico a implementarse se muestra en la Figura 81.

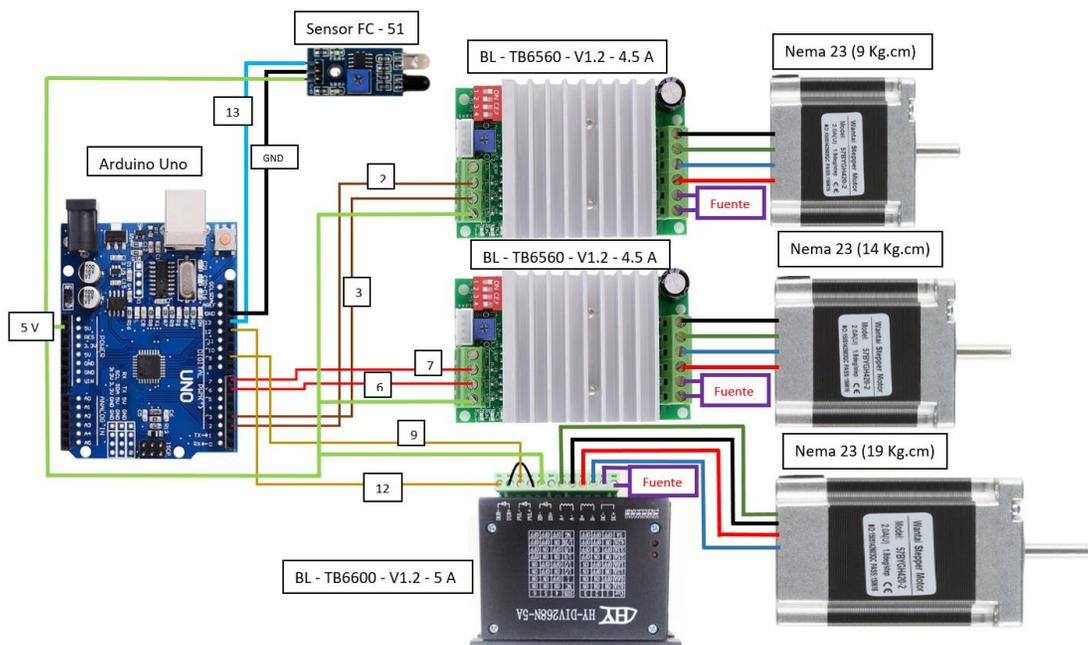


Figura 81 Diagrama del circuito eléctrico

1. Se realiza la conexión entre Arduino y drivers como se muestra en la Figura 82.

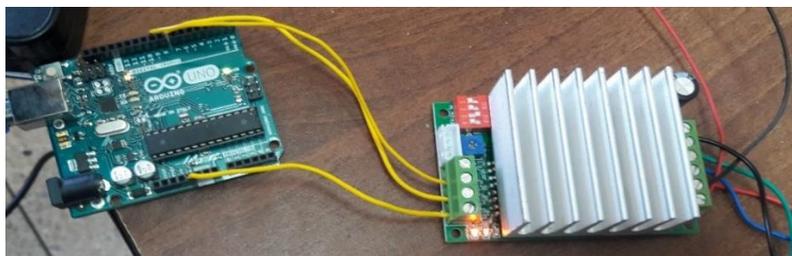


Figura 82 Conexión driver-Arduino

2. El Arduino Uno utilizado es el encargado de alimentar con 5 voltios a los drivers de los motores paso a paso, en cambio para la alimentación de los mismos se utilizó la fuente de alimentación de 24 voltios y 15 amperios.
3. Se conectan los drivers a la fuente de alimentación como se observa en la Figura 83.



Figura 83 Conexión drivers – fuente de alimentación

4. La localización del circuito de control del sistema es debajo de la matriz omnidireccional, para lo cual es necesario colocar una base en la parte inferior de la máquina la cual cumplirá con la función de sostener el circuito como se muestra en la Figura 84.



Figura 84 Base de soporte del circuito de control

5. El arranque de alimentación del circuito (máquina en general), está comandado por un botón normalmente abierto.
6. Las conexiones generales del circuito (fuente de alimentación – botón de arranque – Arduino Uno– drivers - motores), están distribuidas por las paredes

laterales y bajas de la máquina las mismas que son sostenidas por canaletas como se observa en la Figura 85.

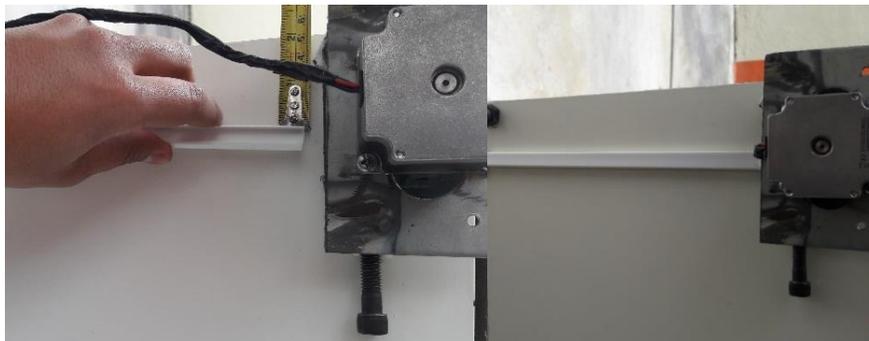


Figura 85 Ubicación de canaletas

7. Es necesario realizar extensiones de los cables que integran el circuito ya que la distancia entre los motores y el circuito del control son amplias.
8. El circuito es sujetado a la placa de soporte como se muestra en la Figura 86.

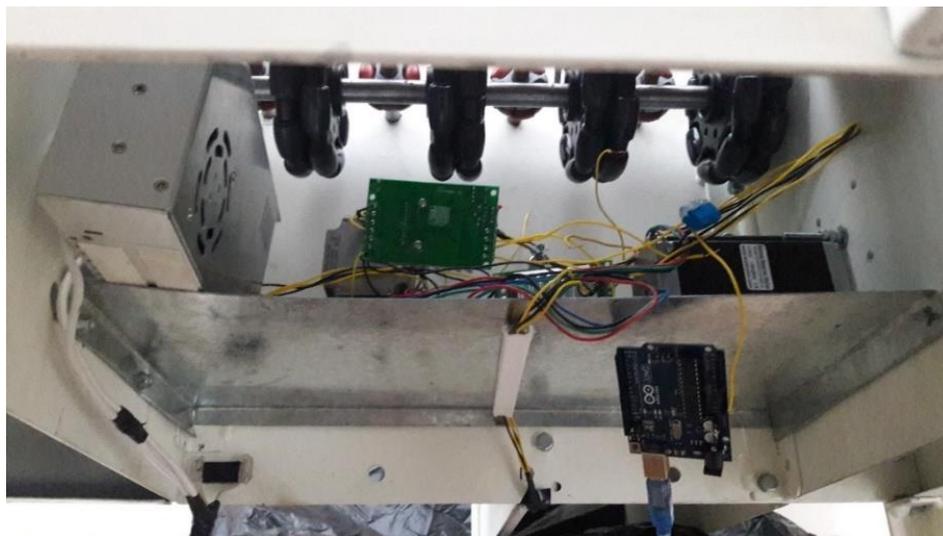


Figura 86 Circuito sobre la placa de soporte

Los componentes de la máquina se muestran de una manera más detallada en la Figura 87.

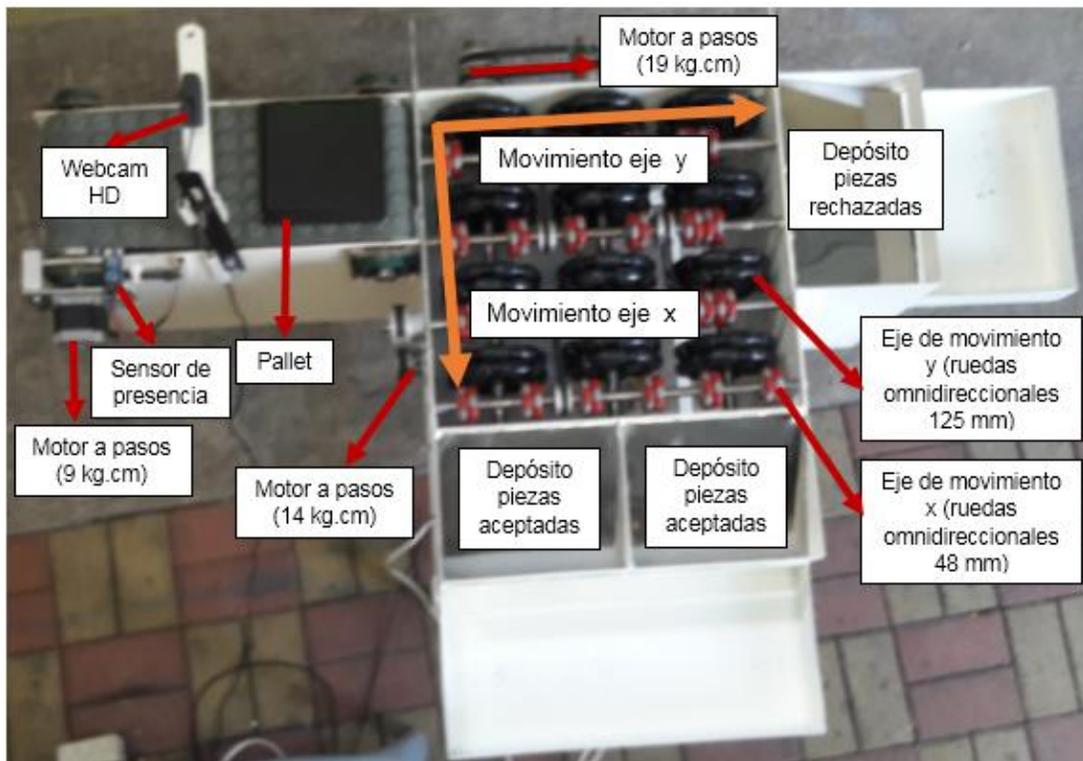


Figura 87 Partes generales del mecanismo omnidireccional

3.5. Selección e instalación de la cámara

Para la visión artificial es necesario que la imagen captada tenga una buena resolución por lo que se necesita una cámara de alta definición y de pequeñas dimensiones. En el mercado existen varios tipos de cámaras HD, pero una de las más económicas es la cámara web, que a pesar de su reducido tamaño existen en alta definición.

Se seleccionó la cámara web Genius FaceCam 1000X, la cual es factible para el sistema de visión artificial ya que tiene una alta resolución y es económica, sus características técnicas se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14*Características técnicas de la cámara web*

Características técnicas de la cámara web	
Característica	Especificación
Requisitos del sistema	Windows XP, VISTA, 7 o superior
	Mac OS 10.4.6 o posterior
	Linux 2.6.21 anterior
	Puerto USB
Sensor de imagen	CMOS de píxeles de alta definición 720p
tipo de lente	objetivo de enfoque manual
Formato de archivo	AVI/WMV
Resolución	1MP, 1280 x 720, 640 x 480 pixels
Dimensiones (A x A x P)	20 x 22 x 60 mm

Fuente: (Genius, 2018)

La instalación de la cámara en el sistema se muestra en la Figura 88.

**Figura 88** Ubicación de la cámara web

CAPÍTULO IV

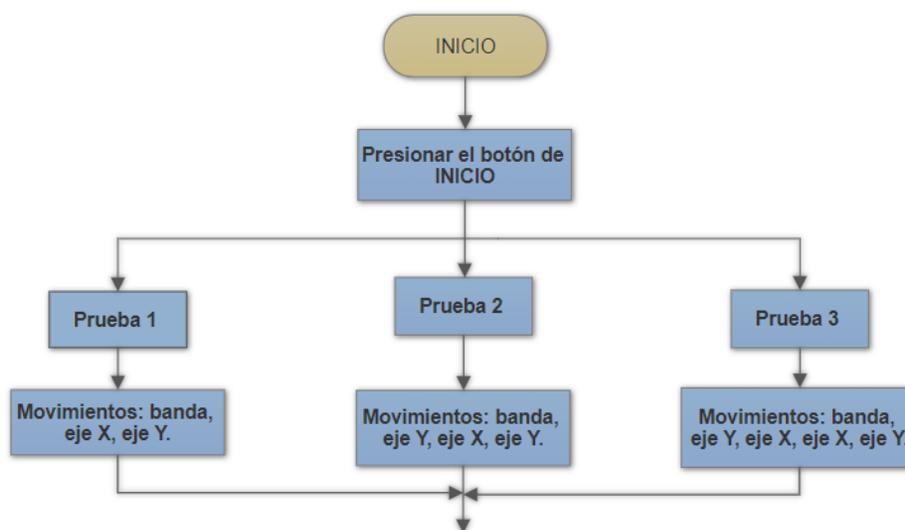
SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se analizará el diseño e implementación del software utilizado para comandar a los dispositivos que permiten el funcionamiento del sistema, usando una interfaz gráfica que permite reconocer las piezas impresas a través de un sistema de visión artificial y así poder clasificarlas de una manera correcta.

4.1. Descripción general

El sistema requiere de un software que permita el control de los motores, dependiendo de la pieza que se identifique mediante el sistema visión artificial y la tarjeta de control Arduino para poder clasificar dicho objeto, esto mediante el uso de redes neuronales. Además, se necesita una interfaz gráfica que tenga ciertos parámetros que permitan trabajar con el sistema de una manera amigable al para el usuario.

Para un mejor entendimiento en la Figura 89 se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento general del programa.



CONTINÚA →

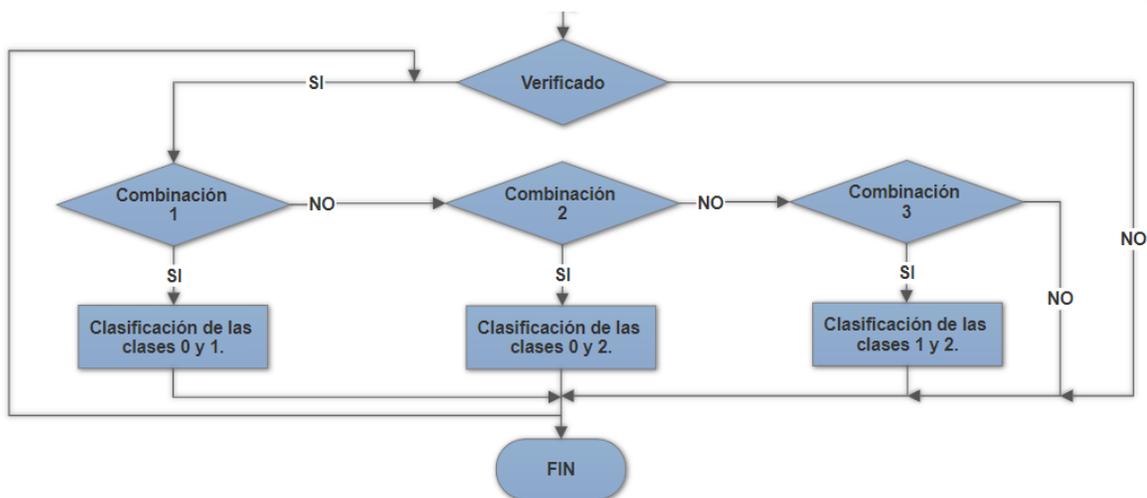


Figura 89 Diagrama de flujo del programa

4.2. Adquisición de imágenes

Al realizar la red neuronal se necesitan imágenes para poder entrenarla para lo que se creó un programa que permite tomar varias fotos de las piezas impresas y guardarlas usando comandos para filtrarlas, lo que hace que el reconocimiento sea más factible como se observa en la Figura 90.

```

Canny(img, dst, 425, 230, 3);
cvtColor(dst, cdst, CV_GRAY2BGR);
HoughLinesP(dst, lines, 5, CV_PI/180, 40, 40, 10);
kernel = cv::getStructuringElement(MORPH_ELLIPSE, Size(6,6));
dilate(cdst, k, kernel);
morphologyEx(k, k, MORPH_OPEN, kernel);
morphologyEx(k, k, MORPH_CLOSE, kernel);
threshold(k,k,70,255,THRESH_BINARY_INV);
medianBlur(k,k,3);
  
```

Figura 90 Código para el filtrado de la imagen

Al realizar el filtrado de las imágenes se usaron los siguientes comandos:

- Canny: Permite detectar los bordes de las piezas impresas (ver Figura 91) lo que es muy importante para poder diferenciarlas las unas de las otras.

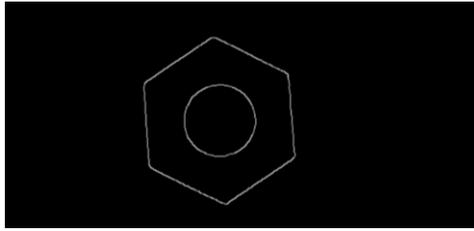


Figura 91 Imagen con el filtro Canny

- HoughLines: Ayuda en la detección de bordes, ya que con este comando se puede detectar las líneas rectas que se encuentran en los objetos captados por la cámara.
- Dilate: Aumenta el tamaño del borde de los objetos captados para poder reconocerlos de forma más fácil como se observa en la Figura 92.

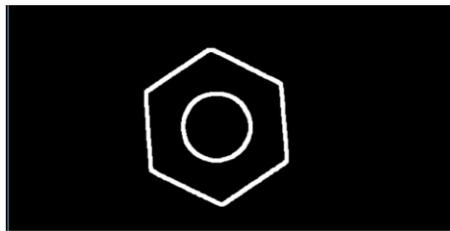


Figura 92 Aplicación del comando Dilate

- Morfología de apertura: Es útil para eliminar los ruidos que están fuera de la región de interés (ver Figura 93).
- Morfología de cierre: Es útil para eliminar los ruidos que están dentro de la región de interés (ver Figura 93).

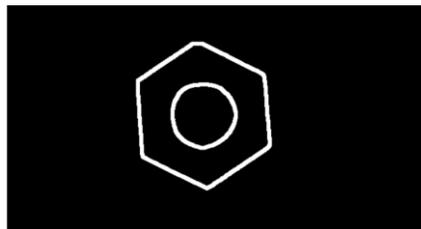


Figura 93 Morfología de apertura y cierre para eliminar ruidos

- **Threshold:** Para filtrar el color de la imagen y además invertir los colores para que el fondo sea blanco y la imagen captada sea negra como se observa en la Figura 94.



Figura 94 Inversión de colores en la imagen

- **MedianBlur:** Es muy efectivo para realizar el último filtrado de la imagen y así se puede evitar el ruido de sal y pimienta que queda en la misma como se ve en la Figura 95.



Figura 95 Filtrado final de la imagen con MedianBlur

Además, se utilizó un código para guardar las imágenes de manera automática con el comando “imwrite” y la imagen se captura y se guarda en una carpeta cada vez que se presiona la tecla “s” (ver Figura 96).

```
imshow("Imagen",k);

if (key == 115) {
    imwrite("C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\ann\\img\\test_set\\4\\img ("
        +snapshotFilename + ").png", k);
    numSnapshot++;
    snapshotFilename = static_cast<std::ostringstream*>
        (&(std::ostringstream() << numSnapshot))->str();
}
```

Figura 96 Código para capturar y guardar la imagen

Al correr este programa se tomaron 300 fotos de cada objeto a clasificar en diferentes posiciones para utilizarlas al entrenar a la red. El programa facilita el trabajo debido a los comandos explicados anteriormente, ya que las imágenes fueron filtradas correctamente y no existe ruido.

4.3. Redes Neuronales Artificiales

Es necesario usar redes neuronales artificiales para realizar la clasificación de las piezas de prototipado rápido, esto es posible gracias al uso de clasificadores los cuales están presentes en el software OpenCV y sirven para crear una base de datos con las imágenes a reconocer y poder compararlas con las que son tomadas en tiempo real.

Para la creación del algoritmo de programación se debe tener en cuenta que una red neuronal consta de tres etapas: pre-entrenamiento, aprendizaje y clasificación. (Matich, 2001)

4.3.1. Pre-entrenamiento

En la etapa de pre-entrenamiento se realiza la adquisición de imágenes explicada en la sección 4.2 las cuales se dividirán en dos carpetas que son: de entrenamiento y pruebas, las que a su vez contienen cinco carpetas con las imágenes que se usarán para realizar la clasificación como se puede ver en la Tabla 15.

Tabla 15

Carpetas para el entrenamiento de la red

Carpetas para el entrenamiento de la red	
Nombre de carpeta	Contenido
0	Hexágono con agujero
1	Cuadrado con agujero

2	Letra C
3	Ruido
4	Errónea

Al tener las imágenes listas se crea el primer programa (Figura 98) el cual se encarga de leer las imágenes de entrenamiento y de prueba y las convierte en datos binarios dentro de un bloc de notas como se puede observar en la Figura 97.

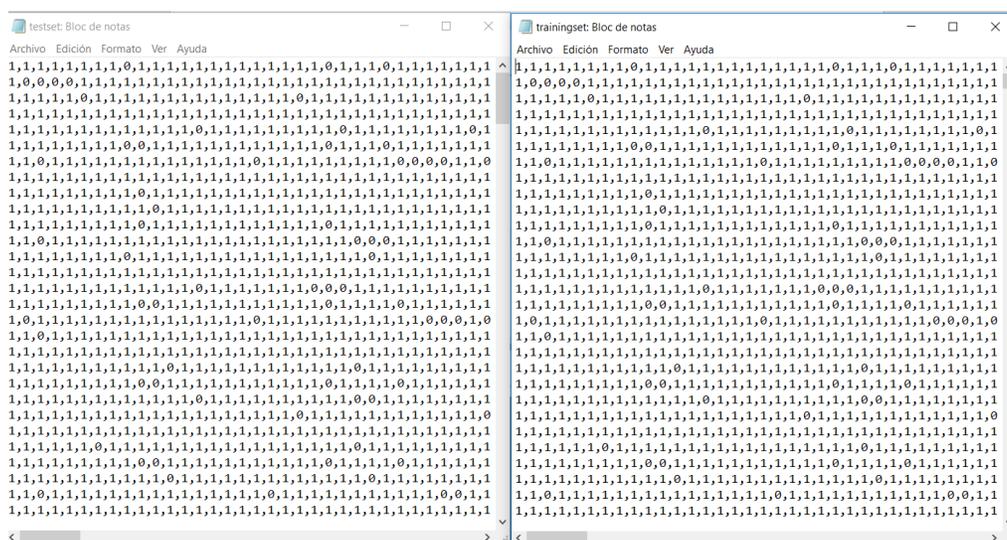


Figura 97 Bloc de notas con los datos binarios

```
int main()
{
    cout<<"Leyendo la carpeta de entrenamiento.....\n";
    readFile("C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\ann\\img\\trainingset\\",300,
            "C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\ann\\datos_rna\\trainingset.txt");
    cout<<"Leyendo la carpeta de prueba.....\n";
    readFile("C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\ann\\img\\trainingset\\",50,
            "C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\ann\\datos_rna\\testset.txt");
    cout<<"Operation completa\n";
    return 0;
}
```

Figura 98 Código para leer las imágenes y convertirlas en datos binarios

4.3.2. Aprendizaje

En la etapa de aprendizaje es necesario los datos binarios de las imágenes de prueba y entrenamiento, ya que estos servirán para que la red tenga la capacidad de diferenciar unas imágenes de otras. Por ello se crea un segundo programa en donde se definirán los parámetros principales que son: 1500 muestras para el entrenamiento, 250 muestras de prueba y 5 clases con las que se trabajará como se observa en la Figura 99. Las 5 clases son las carpetas que se muestran en la Tabla 15 y las muestras son las imágenes que se encuentran dentro de estas.

```
#define TRAINING_SAMPLES 1500 //Numero de muestras de el entrenamiento
#define ATTRIBUTES 256 //Numero de pixeles por muestra 16X16
#define TEST_SAMPLES 250 //Numero de muestras en la prueba
#define CLASSES 5 //Numero de clases.
```

Figura 99 Definición de parámetros

Así como se explica en la sección 2.9.4, esta red está compuesta por las capas de entrada, oculta y de salida las cuales necesitan de una serie de iteraciones para que la información circule entre estas y así la red pueda aprender y diferenciar unas imágenes de otras, en este punto es necesario saber la arquitectura de la red como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Arquitectura de la red

Arquitectura de la red	
Capas	Número de neuronas
Entrada	256
Ocultas	32
Salida	5

La capa de entrada consta de 256 neuronas ya que la región de interés de las imágenes captadas por la cámara es de 16x16 píxeles, la capa de salida consta de 5 neuronas debido a que para la clasificación de las piezas fue necesario crear cinco carpetas, para definir el número de neuronas en la capa oculta se tomaron en cuenta los porcentajes de clasificación correcta que obtuvieron con diferente número de neuronas como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Verificación del error de acuerdo al número de neuronas en la capa oculta

Verificación del error de acuerdo al número de neuronas en la capa oculta			
Nº de neuronas	Nº de imágenes	Imágenes reconocidas	Porcentaje de error
8	250	198	20.8%
16	250	215	14%
32	250	250	0%

De la Tabla 17 se concluye que el número adecuado de neuronas para la capa oculta es de 32 con el que el programa realizó 495 iteraciones para realizar el proceso como se observa en la Figura 100.

```

C:\Qt\Qt5.9.1\Tools\QtCreator\bin\qtcreator_process_stub.exe
Procesando
Iteraciones de entrenamiento: 495
Muestra de testeo 0 -> clase resultante (digit 0)
Muestra de testeo 1 -> clase resultante (digit 1)
Muestra de testeo 2 -> clase resultante (digit 2)
Muestra de testeo 3 -> clase resultante (digit 3)
Muestra de testeo 4 -> clase resultante (digit 4)
Muestra de testeo 5 -> clase resultante (digit 0)
Muestra de testeo 6 -> clase resultante (digit 1)
Muestra de testeo 7 -> clase resultante (digit 2)
Muestra de testeo 8 -> clase resultante (digit 3)
Muestra de testeo 9 -> clase resultante (digit 4)
Muestra de testeo 10 -> clase resultante (digit 0)

```

Figura 100 Proceso de aprendizaje del programa

Se realizaron varias pruebas utilizando diferentes cantidades de imágenes, pero al usar 300 imágenes por figura se logró un resultado de 100% como se puede observar en la Figura 101. Los resultados más detallados se encuentran en la sección 5.1.

```

Resultados de el testeo
      Clasificacion correcta: 250 (100%)
      Clasificacion incorrecta: 0 (0%)
  0   0   1   2   3   4
0  50   0   0   0   0
1   0  50   0   0   0
2   0   0  50   0   0
3   0   0   0  50   0
4   0   0   0   0  50
Press <RETURN> to close this window...

```

Figura 101 Resultados del aprendizaje del programa

Como resultado del aprendizaje se creará una base de datos con formato xml (Figura 102), el cual es utilizado como base para el programa que realizará el reconocimiento de las figuras.

```

CvFileStorage* storage = cvOpenFileStorage( "C:\\Users\\Usuario\\Desktop"
                                           "\\ann\\datos_rna\\param.xml", 0, CV_STORAGE_WRITE );
nnetwork.write(storage,"DigitOCR");
cvReleaseFileStorage(&storage);

```

Figura 102 Código para crear la base de datos

4.3.3. Clasificación

Para realizar la clasificación se crea un programa que sea capaz de interpretar los datos registrados en el archivo de formato xml cuya creación fue explicada en la sección 4.3.2.

En este punto es necesario tener una carpeta que contenga la imagen que se comparará con las otras imágenes que se encuentran en la base de datos, dicha comparación se hará en base a características comunes que compartan las imágenes llamadas descriptores; la imagen que se compara con la base de datos es la que lleva como nombre “img (1)” como se muestra en la Figura 103.

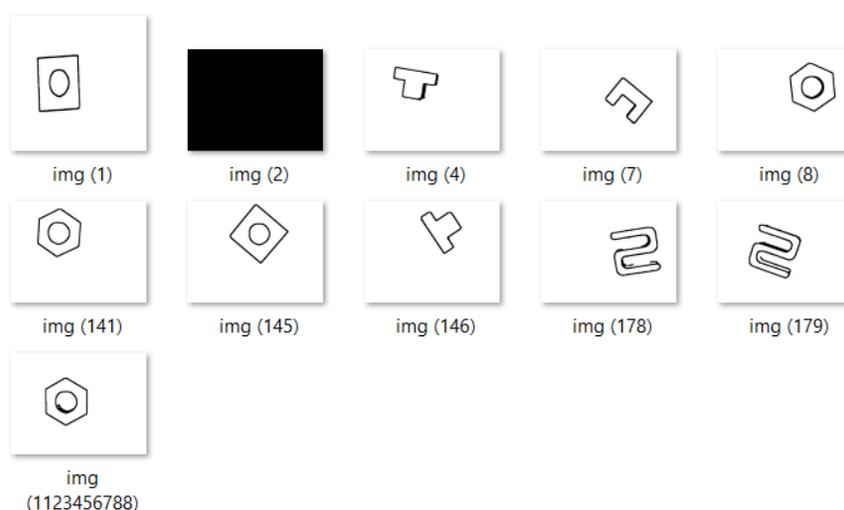


Figura 103 Carpeta con las imágenes a comparar

Para comprobar el funcionamiento de la red neuronal se realizó una prueba con una imagen de la clase 1. Como se puede observar en la Figura 104 el programa tiene un buen reconocimiento, y muestra en el resultado que es un objeto de clase 1.

Este código de clasificación será usado dentro del programa para realizar la interfaz gráfica ya que los archivos con las bases de datos ya fueron creados con los programas de las secciones 4.3.1 y 4.3.2; la diferencia es que en la GUI se tomará una foto a la figura y esta se guardará dentro de la carpeta que contienen las imágenes a comparar.

```

Leyendo la base de entrenamiento.....
Leyendo la base de pruebas.....
operacion completa
n: -1073741824
n2: 0
n3: -1073741824
Valor (digito 0)
Valor (digito -1073741824)
Valor (digito 1073741824)
Valor (digito 1073741824)
Clase resultante (clase 1)
Press <RETURN> to close this window...

```

Figura 104 Resultado al correr el programa de clasificación

4.4. Programación en Arduino

La tarjeta Arduino será usada para realizar el control de los motores a pasos en conjunto con la programación en Qt Creator. Para empezar la programación se asignan los puertos que se van a ocupar para enviar las señales a los motores como se observa en la Figura 105.

```

#define STEP1 3
#define DIR1 2
#define STEP2 6
#define DIR2 7
#define STEP3 9
#define DIR3 12
int incomingByte = 0;
int a1;

```

Figura 105 Declaración de los puertos a usar en el Arduino

Para realizar el control de cada motor se usaron sentencias switch-case (Figura 106), con las que se pueden enviar señales al motor dependiendo el caso que se requiera. Las variables DIR sirven para fijar una dirección, y STEP conjunto con la

sentencia FOR sirven para mandar los pulsos necesarios que se requieren para mover al motor.

```

switch(incomingByte)
{
  case 'a':
    digitalWrite(DIR1,HIGH); //Fijamos una direccion
    digitalWrite(DIR2,LOW); //Fijamos una direccion
    digitalWrite(DIR3,LOW); //Fijamos una direccion

    for(int i=0;i<700;i++){ //Mandamos pulsos al motor
      digitalWrite(STEP1,HIGH);
      delay(1);
      digitalWrite(STEP1,LOW);
      delay(1);
    }
    delay(1000);

```

Figura 106 Sentencias switch-case en Arduino

Los diferentes casos usados en la programación se detallan en la Tabla 18 donde se muestran los pulsos enviados a cada motor y su tiempo de accionamiento.

Tabla 18

Casos utilizados en la programación de Arduino

Casos utilizados en la programación de Arduino			
Caso	Motor	Nº de pulsos	Tiempo de movimiento (segundos)
a	Banda transportadora	700	2
	Ruedas (48 mm)	1500	3
	Ruedas (125 mm)	1500	3
b	Banda transportadora	700	2
	Ruedas (125 mm)	1500	3
	Ruedas (48 mm)	1500	3
	Ruedas (125 mm)	1500	3
c	Banda transportadora	700	2

CONTINÚA 

	Ruedas negras	750	1.5
	Ruedas (48 mm)	750	1.5
	Ruedas (125 mm)	750	1.5
	Ruedas (48 mm)	750	1.5
d	Banda transportadora	425	1
e	Ruedas (125 mm)	500	1
	Ruedas (48 mm)	4000	8
f	Ruedas negras	600	1.2
	Ruedas (48 mm)	1500	3
	Ruedas (125 mm)	3000	6
	Ruedas (48 mm)	4000	8
g	Ruedas (125 mm)	7500	13
h	Banda transportadora	1500	4

4.5. Interfaz gráfica (GUI)

La interfaz gráfica será desarrollada en el software Qt Creator usando el código fuente del programa de redes neuronales con el que se realiza el reconocimiento de las piezas a clasificar. La ventaja de Qt Creator es que su lenguaje es basado en C++ y es compatible con las librerías de OpenCV lo que permite realizar varias aplicaciones y con mayor facilidad.

Para el desarrollo de la interfaz, se debe crear un proyecto nuevo el cual debe ser una aplicación widget (Figura 107), ya que este contiene las librerías que permitirán realizar la interfaz gráfica con todos sus componentes como botones, indicadores, imágenes, etc.

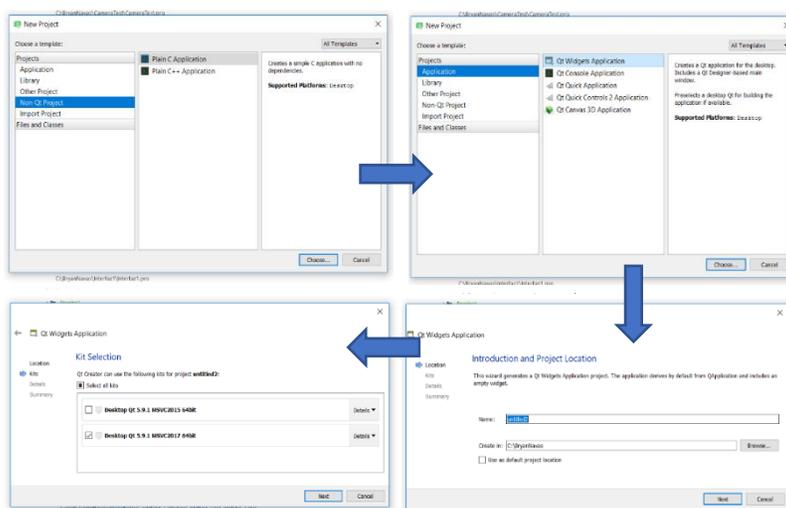


Figura 107 Creación de un nuevo proyecto en Qt

Una vez creado el proyecto se abre la pantalla en donde se va a crear la interfaz gráfica como se puede ver en la Figura 108, aquí se empieza agregando botones y pantallas según se requiera para posteriormente programarlos.

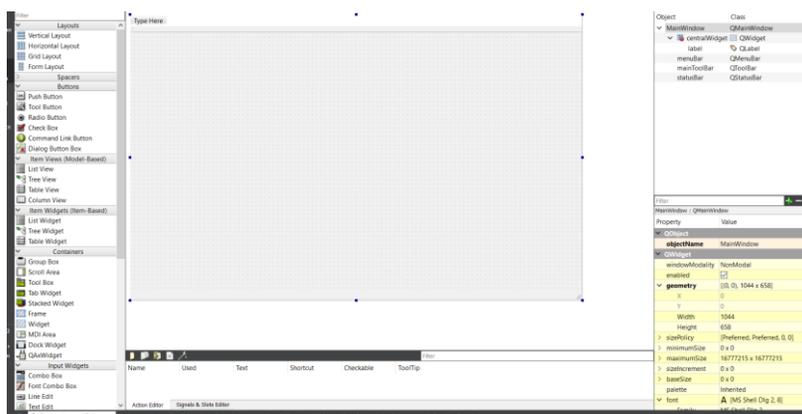


Figura 108 Pantalla para la creación de la interfaz gráfica

4.5.1. Creación de la GUI

Se debe configurar la conexión entre la GUI y el Arduino para que se pueda comandar los motores desde la interfaz, esto se hace mediante el uso de la librería `Windows.h` y el código de la Figura 109.

```

//Declaracion Serial
if (hSerial !=INVALID_HANDLE_VALUE)
{
    printf("Port opened: \n");
    DCB dcbSerialParams;
    GetCommState(hSerial,&dcbSerialParams);
    dcbSerialParams.BaudRate = CBR_9600;
    dcbSerialParams.ByteSize = 8;
    dcbSerialParams.Parity = NOPARITY;
    dcbSerialParams.StopBits = ONESTOPBIT;
    SetCommState(hSerial, &dcbSerialParams);
}
else
{
    if (GetLastError() == ERROR_FILE_NOT_FOUND)
    {
        printf("Serial port doesn't exist! \n");
    }
    printf("Error while setting up serial port! \n");
}
//Fin Declaracion Serial

```

Figura 109 Código para la comunicación entre la GUI y Arduino

Para que la imagen captada por la cámara se presente dentro de la GUI es necesario utilizar un widget tipo label y en el código de la programación se usa la función timer (Figura 110) para capturar los frames cada cierto tiempo y se pueda ver la imagen en tiempo real; además se necesita QImage y QPixmap para que la imagen captada se imprima dentro del widget (Figura 111).

```

timer = new QTimer(this);
connect(timer,SIGNAL(timeout()),this,SLOT(principal()));
timer->start(35);

```

Figura 110 Código de la función timer para captura de frames

```

cv::resize(frame,frame,Size(350,350));
QImage image = QImage((const uchar*)frame.data,frame.cols,
                    frame.rows,frame.step, QImage::Format_RGB888).rgbSwapped();
ui->label->setPixmap(QPixmap::fromImage(image));

cv::resize(k,k,Size(350,350));
QImage image2 = QImage((const uchar*)k.data,k.cols,k.rows,k.step,
                    QImage::Format_RGB888).rgbSwapped();
ui->label2->setPixmap(QPixmap::fromImage(image2));

```

Figura 111 Código para mostrar la imagen original y filtrada en la GUI

Luego de haber creado los labels para la impresión de los frames se mostrarán como en la Figura 112.

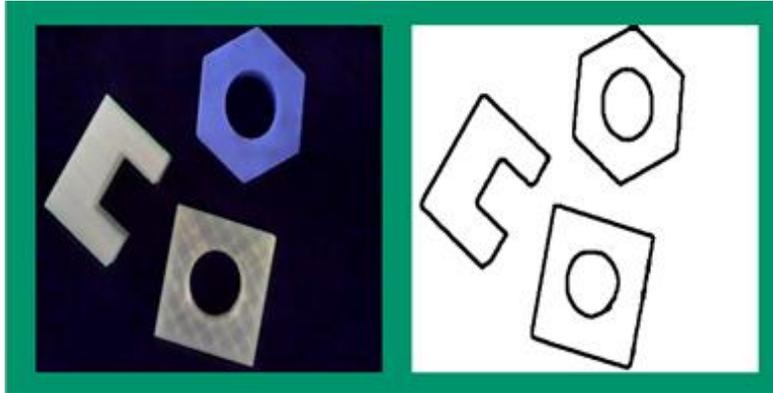


Figura 112 Imagen original y filtrada en la GUI

Para comandar el sistema se requiere de la creación de un menú el cual contiene botones; al crear estos botones se añaden automáticamente clases de cada uno para programarlos y así se pueda ejecutar una acción cada vez que se los presione, en la Figura 113 se muestra la creación de clases por cada botón.

```
void on_Prueba1_clicked();  
void on_Prueba2_clicked();  
void on_Prueba3_clicked();  
void on_Verificado_clicked();  
void on_Inicio_clicked();  
void on_Stop_clicked();  
void on_Comb1_clicked();  
void on_Comb2_clicked();  
void on_Comb3_clicked();
```

Figura 113 Clases creadas por cada botón a utilizar

Los botones creados se utilizarán para diferentes funciones como:

- Inicio: Permite activar los botones de prueba del sistema.
- Stop: Desactiva todos los botones cuando se requiera detener el programa.

- Verificado: Permite activar los botones de combinaciones para inicializar el funcionamiento del sistema.
- Botones de prueba: Se los utiliza para verificar el funcionamiento del sistema asignándole distintas trayectorias.
- Botones de combinación: Sirven para inicializar el sistema y poder clasificar las piezas de prototipado rápido según la combinación deseada.



Figura 114 Botones utilizados en la GUI

En la programación de cada botón se le asignó diferentes condiciones como deshabilitar o habilitar otros botones y cumplir ciertas órdenes como enviar señales a los motores para activarlos como se muestra en la Figura 115.

```
void MainWindow::on_Prueba1_clicked()
{
    ui->Prueba2->setEnabled(false);
    ui->Prueba3->setEnabled(false);
    ui->Inicio->setEnabled(false);

    a1=1;
    b1=0;

    outputChars[0] = 'a';
    WriteFile(hSerial, outputChars, strlen(outputChars), &btsIO, NULL);

    ui->label_9->setStyleSheet("background-color: rgb(65, 255, 77)");
}
```

Figura 115 Programación del botón Prueba 1

4.5.2. Funcionamiento general de la GUI

Al correr el programa se inicializa mostrando las imágenes original y filtrada captadas por la cámara y con el botón “Inicio” habilitado (Figura 116), una vez que se presione este botón aparecerá un cuadro de diálogo y se activarán los botones de prueba.



Figura 116 Inicialización de la GUI

Al presionar uno de los botones de prueba se deshabilitarán los otros hasta que acabe de realizarse dicha prueba. Es necesario realizar las tres pruebas para que se habilite el botón “Verificado”, el cual habilitará los botones de combinación como se muestra en la Figura 117, Figura 118 y Figura 119.



Figura 117 Activación del botón “Inicio”



Figura 118 Activación del botón “Prueba 1”

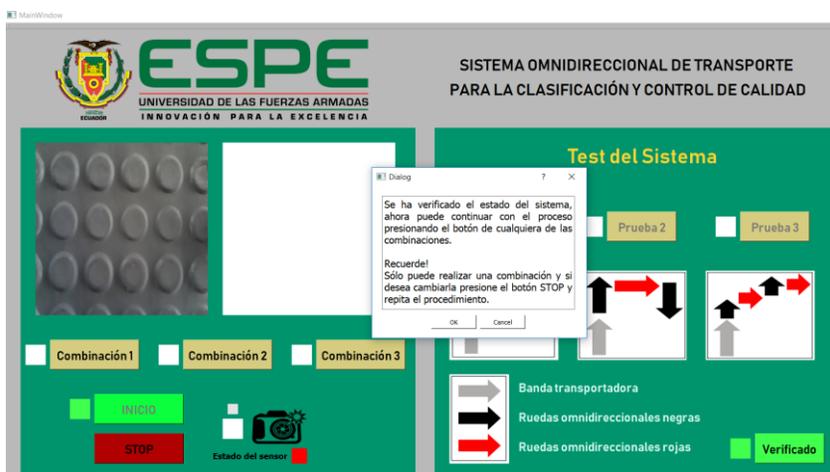


Figura 119 Activación de “Verificado” luego de realizar las 3 pruebas

Luego de presionar el botón “Verificado” se muestra otro cuadro de diálogo y se activan los botones de combinación los que funcionan de la siguiente manera:

- Combinación 1: Permite clasificar las piezas en forma de hexágono y cuadrado.
- Combinación 2: Permite clasificar las piezas en forma de hexágono y de C.
- Combinación 3: Permite clasificar las piezas en forma de cuadrado y de C.

El tratamiento de las piezas que el sistema va a clasificar se muestran en la Figura 120.

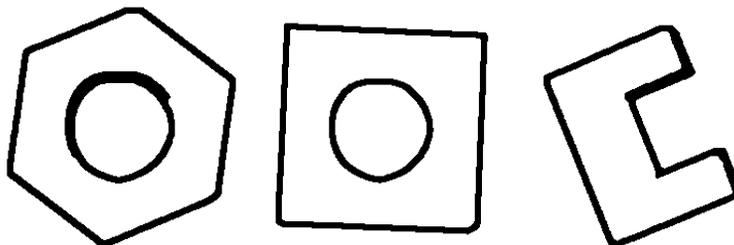


Figura 120 Piezas en forma de hexágono, cuadrado y C

Al presionar uno de los botones de combinación y el sensor de presencia detecte un objeto la banda transportadora se activará hasta que el objeto se posicione debajo de la cámara, donde esta tomará una foto, la comparará con la base de datos de la red neuronal para clasificarla (Figura 121) activando los motores correspondientes de las ruedas y enviando al objeto al lugar asignado donde deba clasificarse.



Figura 121 Activación del botón “Combinación 1”

Al presionar el botón “Stop” se desactivarán todos los botones menos el de “Inicio” para poder reiniciar el sistema como se muestra en la Figura 122.



Figura 122 Activación del botón "Stop"

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se detallan las pruebas realizadas al sistema, tanto el entrenamiento de la red neuronal, reconocimiento de imágenes en diferentes ambientes y el movimiento de los motores.

5.1. Entrenamiento de la red neuronal

La clasificación y control de calidad de las piezas provenientes de procesos de prototipado rápido, está regida por algoritmos basados en redes neuronales, los mimos que dependen de la cantidad de imágenes que tengan en sus muestras para asegurar una clasificación y control de calidad confiables.

Las redes neuronales se basan en su porcentaje error de acuerdo al número de imágenes que tengan, dicha relación es proporcional, es decir mientras más número de muestras tenga la red menor será su error, por tal motivo es necesario realizar pruebas en las cuales se defina el error existente en la red al cargar un determinado número de imágenes.

Para cargar las imágenes a la red neuronal es necesario dos carpetas, una con las imágenes con la que se va a entrenar (Training set) y otra con las imágenes que se van a comparar (Test set) como se explica en la sección 4.3.1, esta comparación es la que da el error existente en la red neuronal. A continuación, se muestran los porcentajes de acierto al cargar 100, 200 y 300 imágenes en la red neuronal (ver Figura 123, Figura 124 y Figura 125).

```

Resultados de el testeo
      Clasificacion correcta: 80 (32%)
      Clasificacion incorrecta: 170 (68%)
    0  1  2  3  4
0  0  4  23  20  3
1  1  14  16  10  9
2  0  15  19  13  3
3  3  3  0  42  2
4  4  7  11  23  5
Press <RETURN> to close this window...

```

Figura 123 Muestras – Clasificación correcta: 32%

```

Resultados de el testeo
      Clasificacion correcta: 105 (42%)
      Clasificacion incorrecta: 145 (58%)
    0  1  2  3  4
0  20  0  19  0  11
1  0  15  16  0  19
2  6  7  13  11  13
3  0  0  1  21  28
4  1  0  2  11  36
Press <RETURN> to close this window...

```

Figura 124 Muestras – Clasificación correcta: 42%

```

Resultados de el testeo
      Clasificacion correcta: 250 (100%)
      Clasificacion incorrecta: 0 (0%)
    0  1  2  3  4
0  50  0  0  0  0
1  0  50  0  0  0
2  0  0  50  0  0
3  0  0  0  50  0
4  0  0  0  0  50
Press <RETURN> to close this window...

```

Figura 125 Muestras – Clasificación correcta: 100%

Como se puede observar en la Tabla 19 el porcentaje de acierto al utilizar 300 imágenes de muestra es de: 100%, por tal motivo se utiliza 300 muestras por pieza para entrenar al clasificador.

Tabla 19

Resultados del entrenamiento de la red neuronal

Resultados del entrenamiento de la red neuronal	
Nº de muestras	Porcentaje de aciertos
500	32%
1000	42%
1500	100%

Otro detalle que es importante destacar para lograr un porcentaje de acierto alto al entrenar a la red neuronal es el tratamiento previo que hay de darle a las muestras antes de ingresar una imagen, ver sección 4.2.

5.2. Reconocimiento de imágenes

El reconocimiento de imágenes es el principal aspecto a tomar en cuenta en sistemas en los cuales se utilice una cámara como un elemento sensor, debido a que en el sistema del presente trabajo la visión artificial es la que comandó la clasificación y el control de calidad, por tal motivo el sistema debe de ser capaz de reconocer las imágenes en cualquier momento. Las pruebas que se muestran a continuación son para definir qué grado de reconocimiento el sistema posee ante cambios de luz, para lo cual se han definido 3 ambientes.

5.2.1. Prueba ambiente 1: Sistema con poca iluminación

En esta prueba la presencia de luz en el sistema es muy escasa, estas condiciones se presentan cuando dentro del lugar donde se va a trabajar todas las luces se

encuentran apagadas y además no hay ingreso de luz de los exteriores. La respuesta del sistema ante estas condiciones de luz se muestra en la Figura 126.

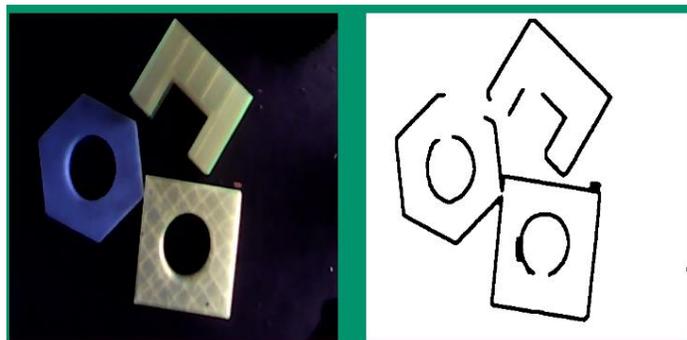


Figura 126 Ambiente poco iluminado

Como se observa en la Figura 126, la detección es mala, ya que no se muestra la forma completa de las piezas, lo que dificulta la clasificación y no permite recopilar los suficientes descriptores para comparar con las muestras de la red neuronal.

5.2.2. Prueba ambiente 2: Sistema con iluminación natural

En esta prueba la presencia de luz en el sistema proviene de agentes externos al sistema como la luz natural del ambiente y la iluminación del lugar donde se trabaje como focos o lámparas instaladas en el techo del lugar de trabajo. La respuesta del sistema ante estas condiciones de luz se muestra en la Figura 127.

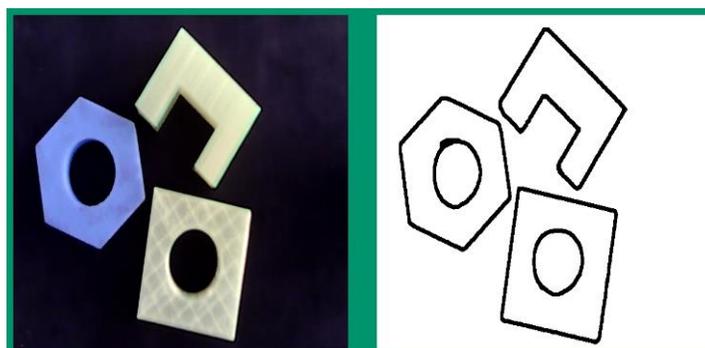


Figura 127 Ambiente con iluminación natural

Como se observa en la Figura 127, la detección es buena, no se pierden puntos de la imagen y se obtienen todos los descriptores para poder comparar con las muestras dentro de la red neuronal.

5.2.3. Prueba ambiente 3: Sistema completamente iluminado

En esta prueba la presencia de luz en el sistema es excesiva, es decir a más de la luz natural como en el caso de la sección 5.2.2, se tiene una luz artificial instalada dentro del sistema de visión artificial ya sea proveniente de una lámpara o un foco incandescente. La respuesta del sistema ante estas condiciones de luz se muestra en la Figura 128.

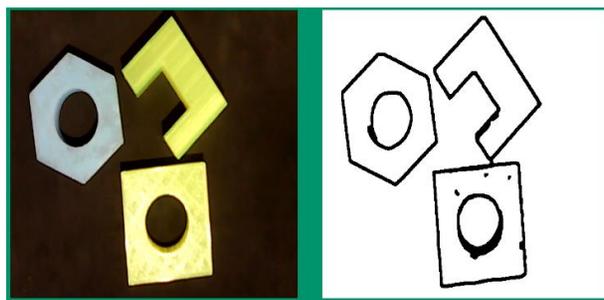


Figura 128 Ambiente completamente iluminado

Como se observa en la Figura 128, la detección es buena, pero se presenta ruido en la imagen lo que dificulta la comparación, ya que los descriptores presentan más información de la que requieren y lo que puede afectar el funcionamiento del sistema.

5.2.4. Selección del Ambiente de Trabajo

Una vez realizadas las pruebas, es necesario seleccionar el ambiente idóneo para el funcionamiento del sistema, como se observa en la Figura 129 el ambiente 2 es el seleccionado debido a que estas condiciones de luz son más fáciles de conseguir y la

detección del sistema es la mejor, asegurando una buena clasificación y control de calidad, ya que los descriptores de las imágenes son detectados y sin ruido.



Figura 129 Sistema en ambiente con iluminación natural

5.3. Clasificación de piezas

El sistema está diseñado para clasificar 3 tipos de piezas, las mismas que se muestran en la Figura 130.

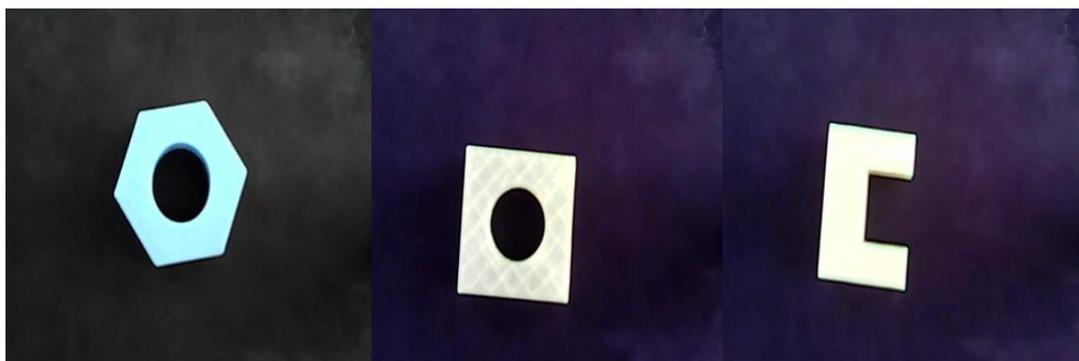


Figura 130 Piezas a clasificar por el sistema

En la Figura 130 se encuentran las piezas para las que el sistema está entrenado para clasificar. El software identifica cada figura como un número específico como se muestra a continuación:

- Hexágono con Agujero: Número 0
- Cuadrado con Agujero: Número 1
- Letra C: Número 2
- Erróneas: Número 3 o 4

La prueba de reconocimiento de figuras se realiza en el ambiente seleccionado en la sección 5.2.2., como se muestra en las Figuras 131 – 136.

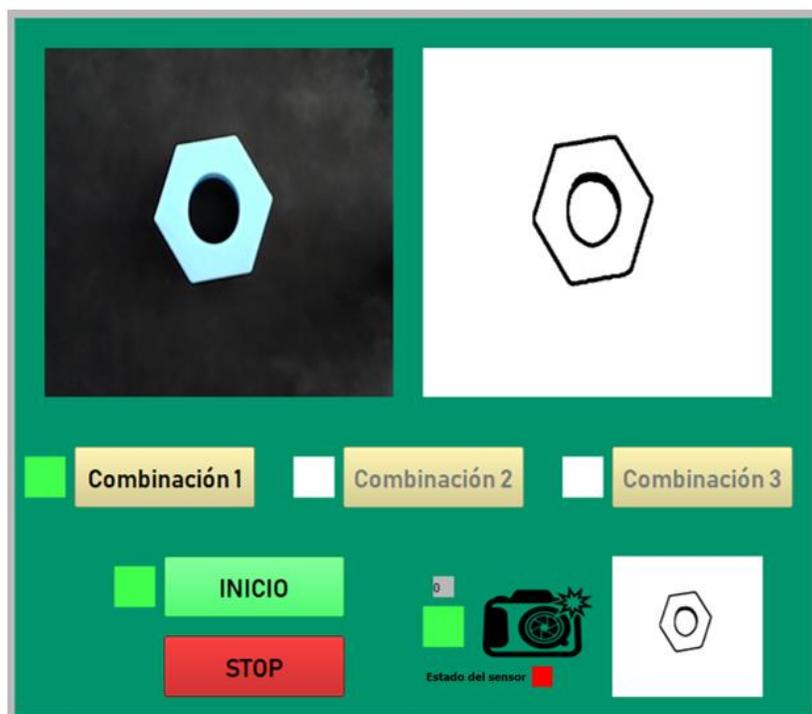


Figura 131 Reconocimiento de hexágono con agujero

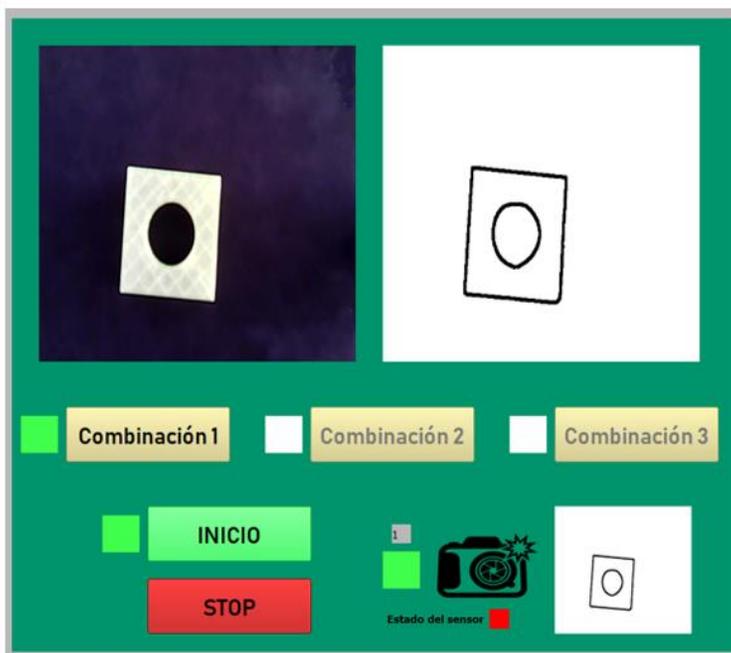


Figura 132 Reconocimiento de cuadrado con agujero



Figura 133 Reconocimiento de letra C

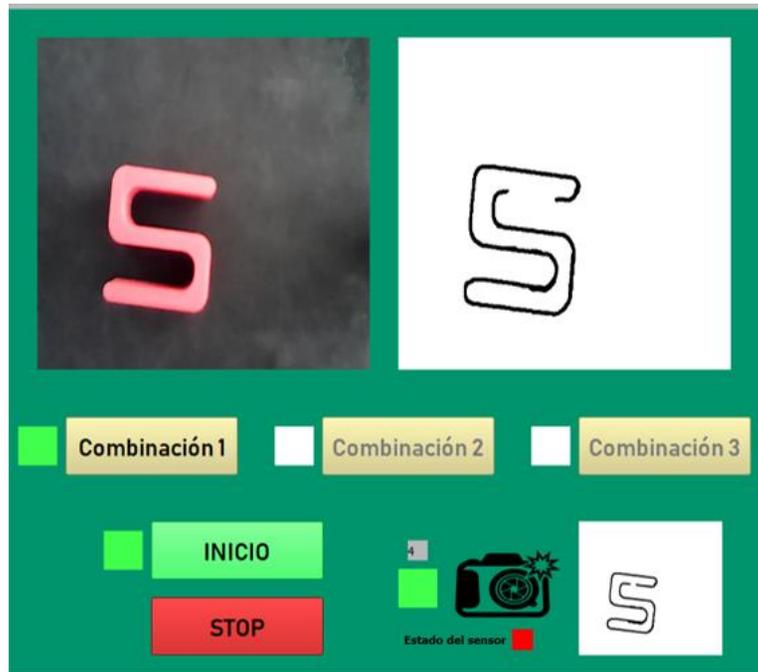


Figura 134 Reconocimiento de figura errónea S

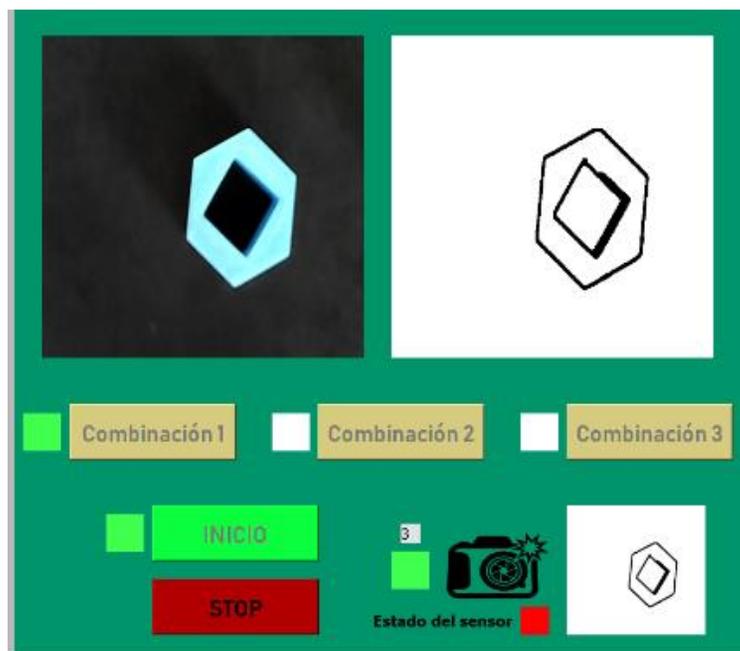


Figura 135 Reconocimiento de figura errónea hexágono con agujero

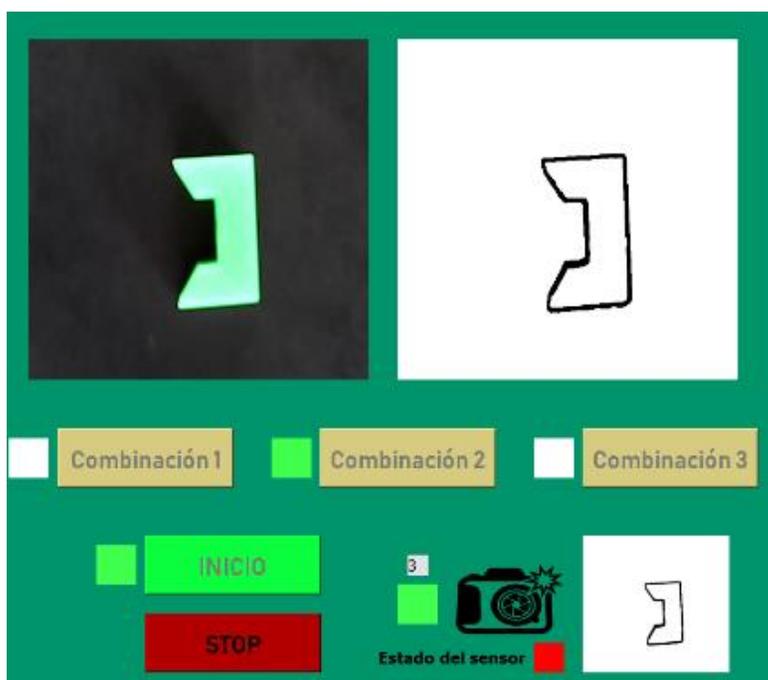


Figura 136 Reconocimiento de figura errónea letra C

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 20

Resultados del reconocimiento

Tabla de resultados				
Figura	Clase	Nº de pruebas	Clasificación correcta	Porcentaje de acierto
Hexágono con agujero	0	50	46	92%
Cuadrado con agujero	1	50	45	90%
Letra C	2	50	43	86%
Errónea letra S	4	50	46	92%
Errónea hexágono	3	50	43	86%
Errónea letra C	3	50	45	90%

5.3.1. Pruebas con diferentes tamaños de piezas

Para verificar el reconocimiento de forma se realizaron pruebas con piezas de diferentes dimensiones las mismas que se especifican en la Tabla 21. Se realizaron pruebas de reconocimiento con los diferentes tamaños de cada pieza como se observan en la Figura 137, Figura 138 y Figura 139.

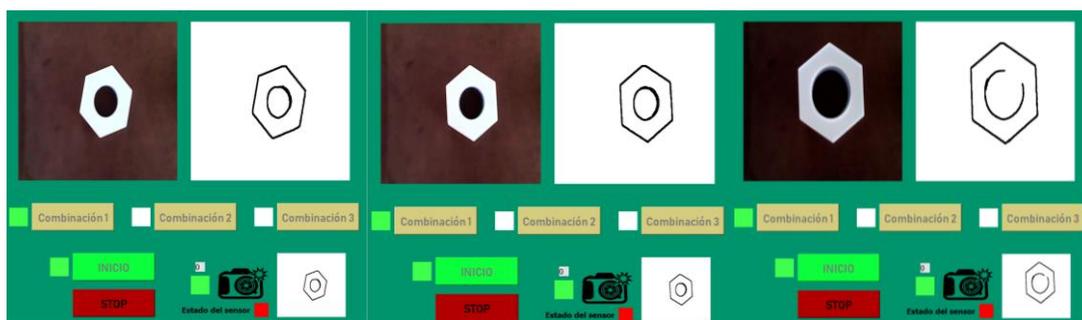


Figura 137 Reconocimiento del hexágono con agujero

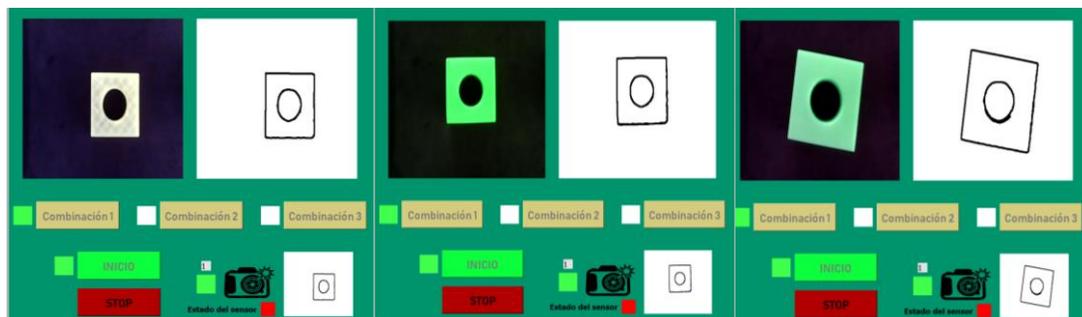


Figura 138 Reconocimiento del cuadrado con agujero

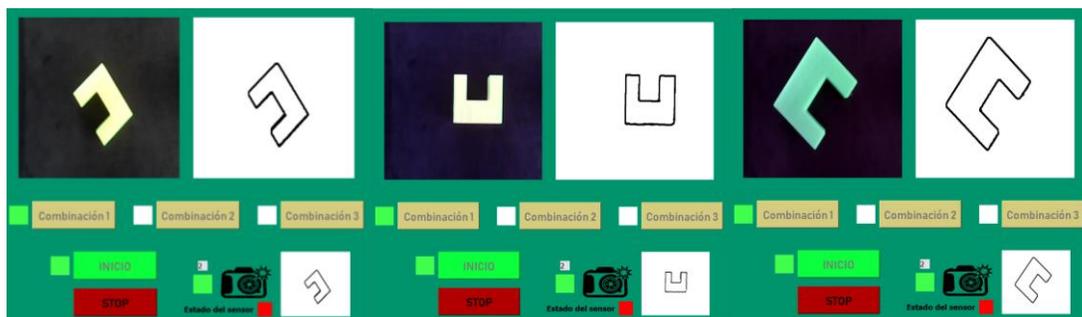


Figura 139 Reconocimiento de la letra C

Tabla 21*Dimensiones de las piezas a clasificar*

Dimensiones de las piezas a clasificar							
Figura	Clase	Nº de pruebas	Dimensiones (mm)			Clasificación correcta	Porcentaje de acierto
			Largo	Ancho	Altura		
Hexágono con agujero	0	50	40	40	10	46	92%
			40	40	15	46	92%
			50	50	20	45	90%
Cuadrado con agujero	1	50	40	40	10	45	90%
			40	40	15	45	90%
			50	50	20	45	90%
Letra C	2	50	38	28	10	43	86%
			38	28	15	43	86%
			50	40	20	42	84%
Errónea letra S	4	50	40	40	15	46	92%
Errónea hexágono	3	50	40	40	15	43	86%
Errónea letra C	3	50	40	40	15	45	90%

Como se puede observar en la Tabla 21, los porcentajes obtenidos son mayores al 80% y al realizar un promedio se obtiene una confiabilidad de 89%.

5.4. Pruebas de movimiento de motores

Antes de arrancar todo sistema es necesario evaluar sus condiciones, para asegurar que su funcionamiento sea adecuado durante todo el tiempo de trabajo. En el mecanismo omnidireccional es necesario evaluar las condiciones del sistema

(movimiento de los motores), para asegurar que su funcionamiento sea el adecuado. En la interfaz gráfica del sistema se tiene una secuencia de pruebas el mismo que es necesario arrancar y evaluar antes de utilizar la máquina como se observa en la Figura 140.



Figura 140 Secuencia de pruebas del sistema

En cada prueba se evalúa una secuencia de movimientos distinta para los motores, la tarea del operador es evaluar el estado del sistema antes de arrancarlo, ya que para ejecutar las combinaciones mostradas en la Tabla 22 es necesario verificar que se cumplan las pruebas de movimientos que están en la Figura 141.



Figura 141 Combinaciones de movimientos de los motores

Para verificar el estado del sistema la interfaz cuenta con un botón de apertura, el cual es “Verificado” (Figura 142), al ser accionado permite utilizar el sistema. Para arrancar con las pruebas del sistema es necesario presionar el botón de inicio, el cual habilita el test del sistema.



Figura 142 Botón Verificado

Cada prueba de movimiento puede ser realizada más de una vez, de acuerdo al criterio del operador de comprobar la calidad del sistema antes de iniciarlo, pero deben ser ejecutadas las tres pruebas para verificar el sistema.

El propósito de las pruebas de movimiento de los motores es para identificar si el sistema presenta retrasos, objetos no deseados dentro, o simplemente un eje se encuentre trabado. La interfaz gráfica cuenta con un led, al lado izquierdo de cada botón el cual se mantiene encendido el tiempo que dura cada prueba de movimiento como se muestran en la Figura 143 y Figura 144.



Figura 143 Botón Inicio

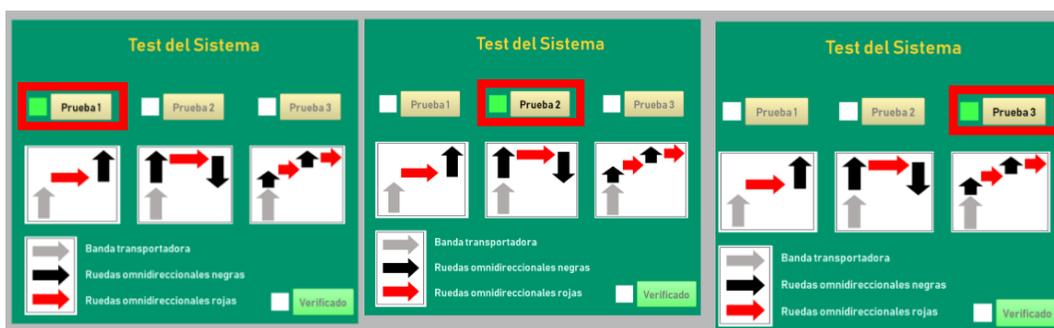


Figura 144 Arranque de las pruebas del sistema

Al verificar el sistema se deshabilitan los botones de pruebas, y se habilitan los botones de combinaciones y el sistema está listo para ser utilizado como se muestra en la Figura 145.



Figura 145 Sistema verificado

En las Figuras 146 - 148 se puede observar el movimiento de los motores dentro del sistema.

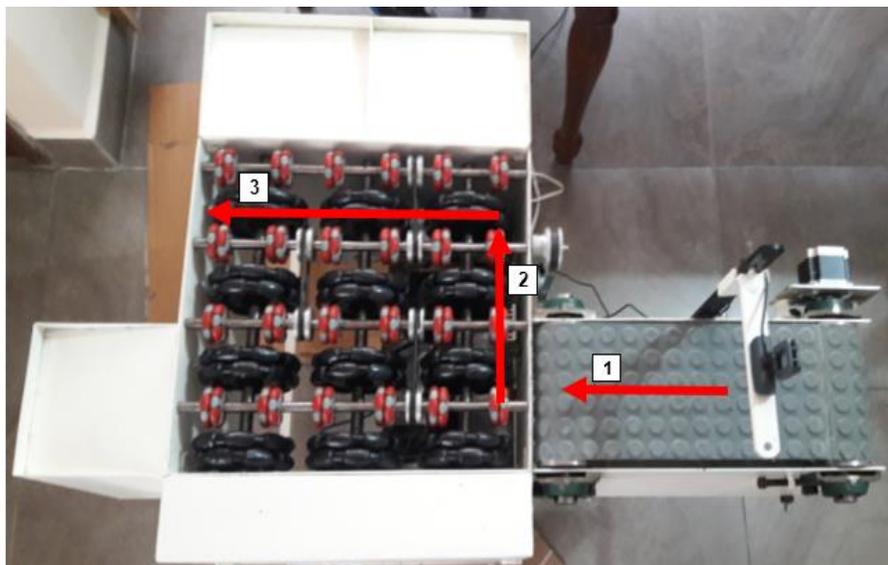


Figura 146 Secuencia de movimiento - Prueba 1

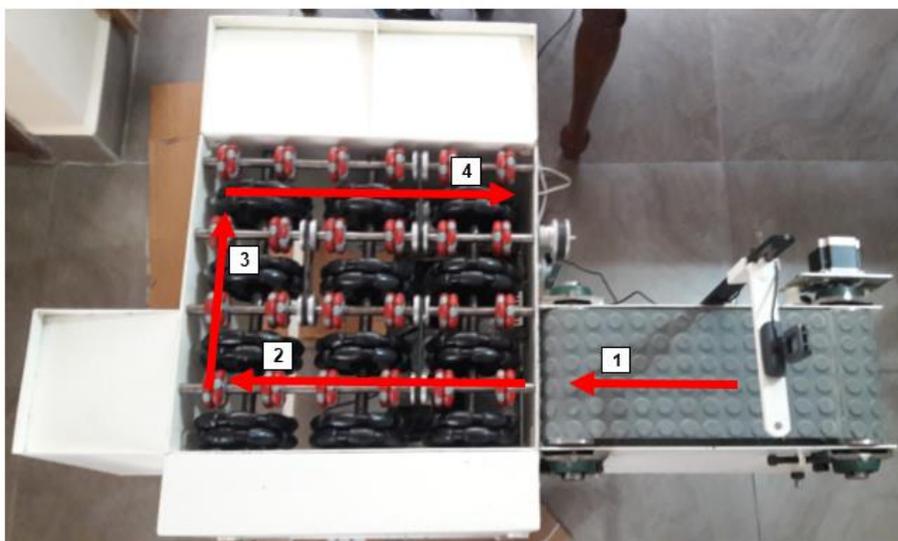


Figura 147 Secuencia de movimiento - Prueba 2

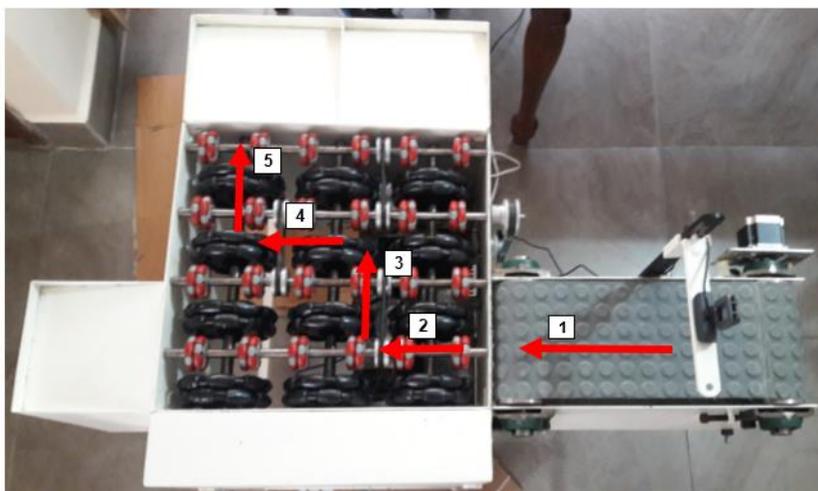


Figura 148 Secuencia de movimiento - Prueba 3

5.5. Pruebas generales de funcionamiento

En este punto se pone a prueba al sistema y se realiza la clasificación de las piezas, dentro del mecanismo omnidireccional.

Antes utilizar el equipo es necesario tener en cuenta los datos de la Tabla 22.

Tabla 22

Información general del sistema

Información general	
Pieza	Número
Hexágono con Agujero	0
Cuadrado con Agujero	1
Letra C	2
Erróneas	3 o 4
Número de Combinación	Piezas
Combinación 1	0 1
Combinación 2	0 2
Combinación 3	1 2

En la Tabla 22 se muestra que piezas clasifica cada combinación, en las Figuras 149 - 151 se indican en que depósito van cada pieza en cada combinación:

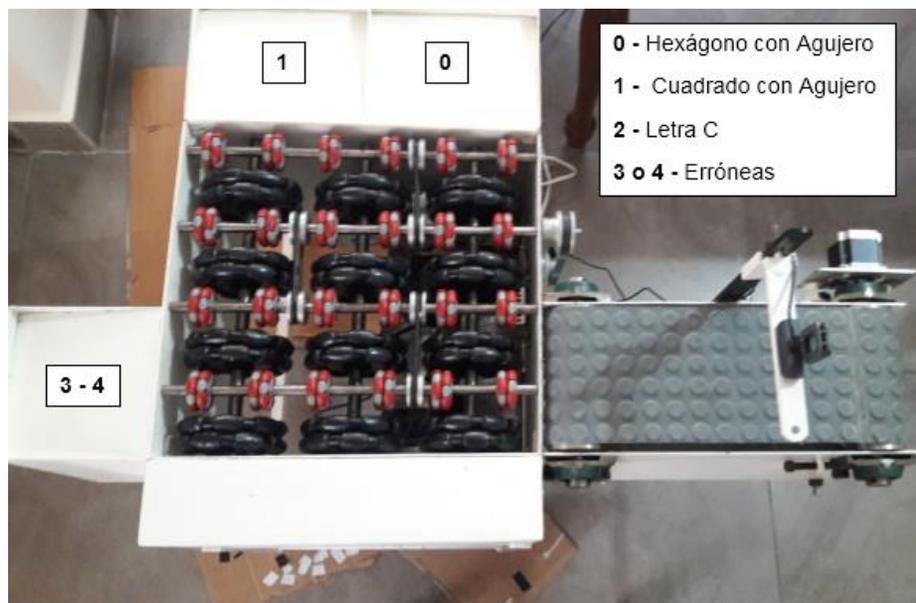


Figura 149 Combinación 1

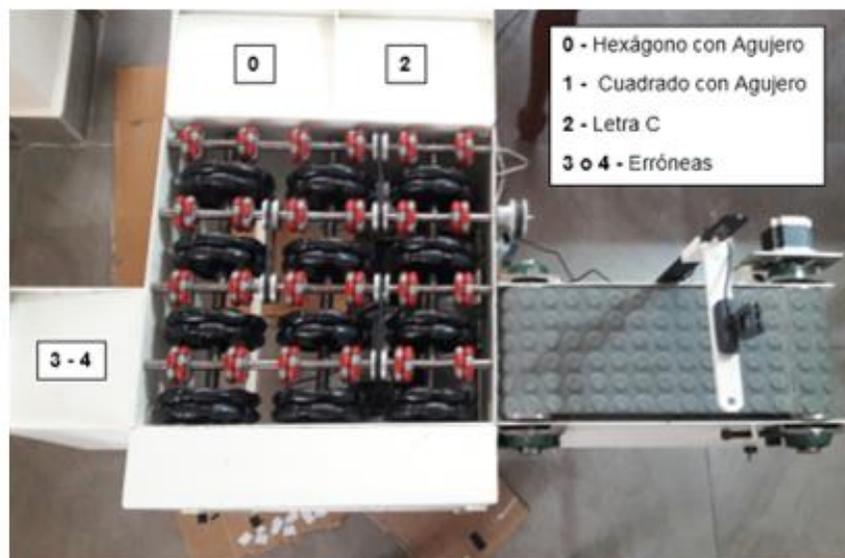


Figura 150 Combinación 2

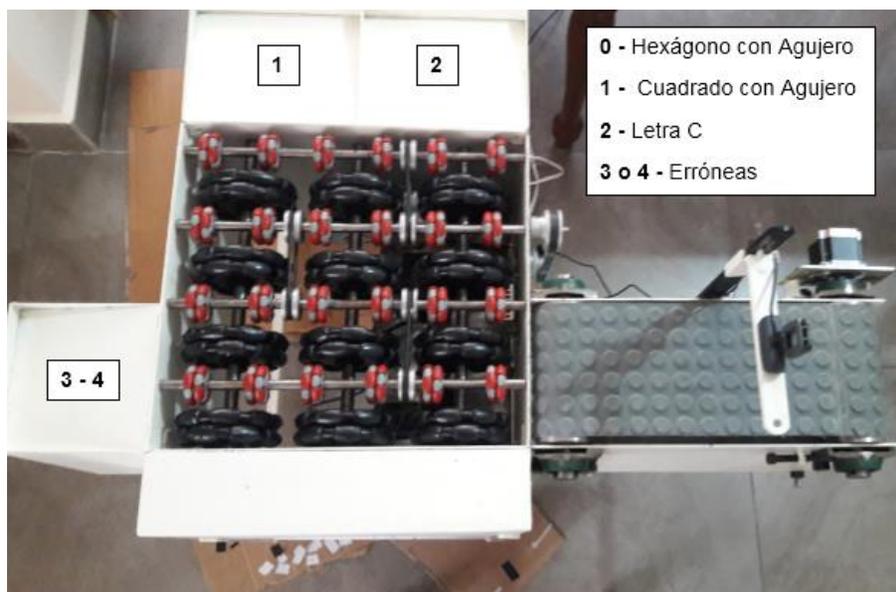


Figura 151 Combinación 3

Una vez descrita la información general del sistema, se arrancan las pruebas generales.

- Como se observa en la Figura 152 se ubica el pallet junto con la pieza a transportarse al comienzo de la banda transportadora.

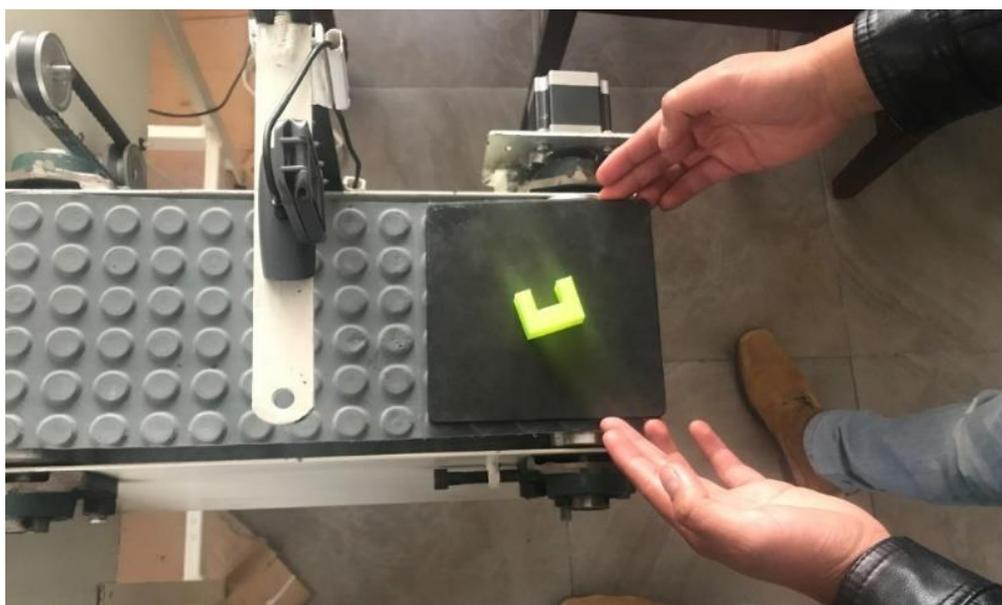


Figura 152 Ubicación de la pieza y el pallet

5.5.1. Pruebas con la combinación 1

- Se arranca el programa presionando el botón Inicio, hasta que el pallet se posicione debajo de la cámara (Figura 153), el software realiza la clasificación, control de calidad, y entrega el número correspondiente (Figura 154), como se explicó en la sección 5.3.

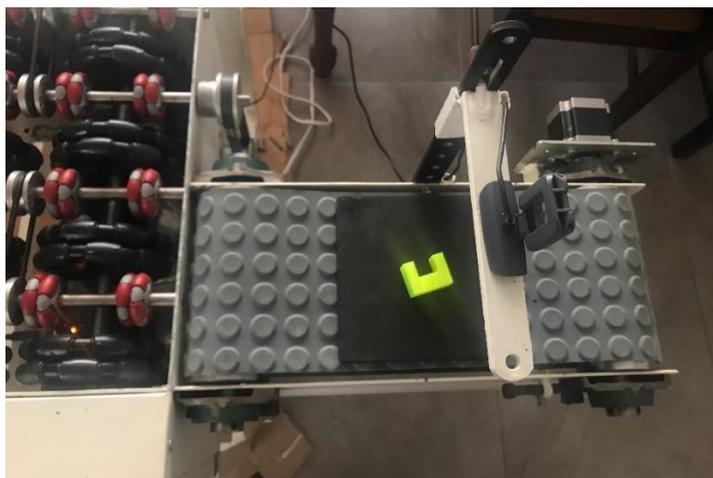


Figura 153 Pieza de la clase 2 ubicada debajo de la cámara

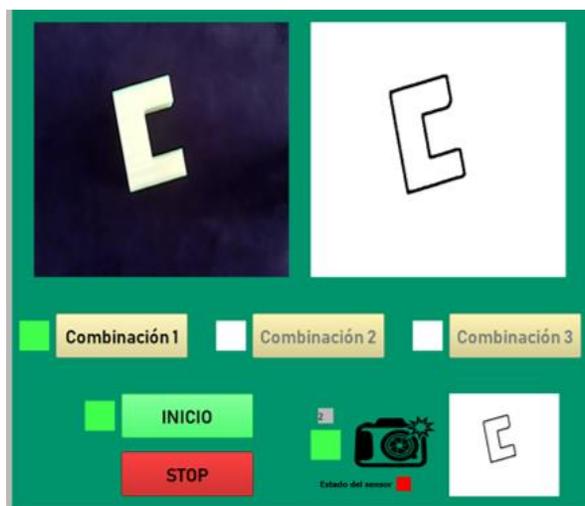


Figura 154 Combinación 1 – Pieza de la clase 2

- Como la pieza ingresada es de la clase 2, no está dentro de las piezas que combinación 1 clasifica (Tabla 22), por tal motivo es tomada como errónea como se muestra en la Figura 155.



Figura 155 Movimiento de la pieza #2 por el mecanismo

- Se comprueba que el sistema discretiza una pieza errónea de una correcta en una combinación.
- Se envía una pieza correcta al sistema dentro de combinación uno como se muestra en la Figura 156.

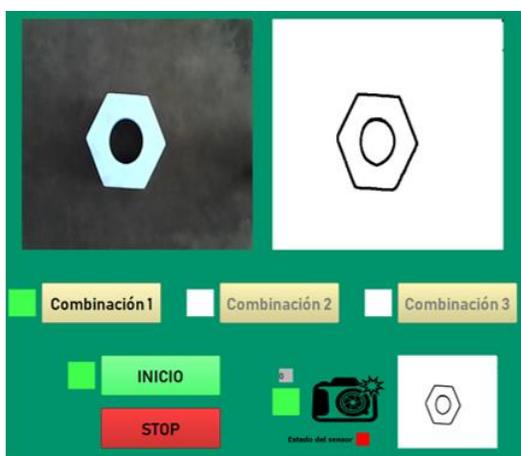


Figura 156 Combinación 1 – Pieza de la clase 0

- El sistema es capaz de clasificar las piezas correctas como se muestra en la Figura 157.



Figura 157 Movimiento de la pieza de la clase 0 por el mecanismo

- Se repite el proceso con las demás piezas.



Figura 158 Combinación 1 – Pieza de la clase 1



Figura 159 Movimiento de la pieza de la clase 1 por el mecanismo



Figura 160 Combinación 1 – Pieza errónea de la clase 4



Figura 161 Movimiento de la clase 4 por el mecanismo

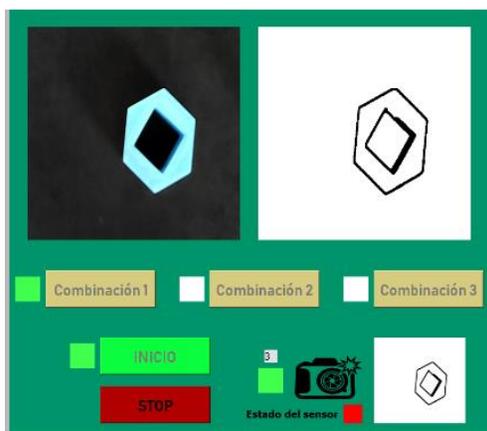


Figura 162 Combinación 1 – Pieza errónea de la clase 3



Figura 163 Movimiento de la pieza de la clase 3 por el mecanismo

5.5.2. Pruebas con la combinación 2



Figura 164 Clasificación de la pieza de la clase 0 con la combinación 2



Figura 165 Clasificación de la pieza de la clase 2 con la combinación 2



Figura 166 Clasificación de la pieza de la clase 1 con la combinación 2



Figura 167 Clasificación de la pieza de la clase 3 con la combinación 2

5.5.3. Pruebas con la combinación 3



Figura 168 Clasificación de la pieza de la clase 2 con la combinación 3



Figura 169 Clasificación de la pieza de la clase 1 con la combinación 3



Figura 170 Clasificación de la pieza de la clase 0 con la combinación 3



Figura 171 Clasificación de la pieza errónea con la combinación 3

La clasificación y control de calidad se realiza de forma satisfactoria dentro del mecanismo, esto se debe a que el reconocimiento de las piezas por la visión artificial es correcto. Los resultados de la prueba de transporte de muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

Resultados de las pruebas de transporte del sistema

Resultados de las pruebas de transporte del sistema				
Nº de combinación	Nº de clase	Nº de pruebas	Transporte correcto	Porcentaje de acierto
1	0	50	50	100%
	1		50	100%
	2		50	100%
	errónea		50	100%
2	0	50	50	100%
	1		50	100%
	2		50	100%
	errónea		50	100%
3	0	50	50	100%
	1		50	100%
	2		50	100%
	errónea		50	100%

Como se puede observar en la Tabla 23, los porcentajes obtenidos son de 100% por lo que se obtiene una confiabilidad de 100% en el transporte del sistema.

En la Tabla 24 se muestran los resultados finales obtenidos del sistema tan en clasificación como transporte.

Tabla 24

Resultados finales de las pruebas del sistema

Resultados finales de las pruebas del sistema	
Tipo de prueba	Porcentaje de confiabilidad
Clasificación y control de calidad	89%
Transporte	100%

Como se puede observar en la Tabla 24, se obtiene que la confiabilidad general del sistema es de 89%.

5.6. Comparación con otros sistemas

Es importante compara al mecanismo omnidireccional de transporte, clasificación y control de calidad con otros sistemas para identificar las ventajas y desventajas frente a estos como se observa en la Tabla 25. Los sistemas con los que se realizará la comparación son:

- Sistema omnidireccional con visión artificial: La clasificación es realizada mediante un mecanismo omnidireccional como el que se muestra en el presente proyecto, el sensor es una cámara con algoritmos de visión artificial basados en redes neuronales.

- Sistema con actuadores y visión artificial: La clasificación se realiza mediante pistones y el sensor es una cámara con algoritmos de visión artificial sin la utilización de redes neuronales.
- Sistema con actuadores y sensores: La clasificación se realiza mediante pistones y los sensores son capacitivo o inductivos.

Tabla 25*Comparación con otros sistemas*

Comparación con otros sistemas			
Característica	Sistema omnidireccional con visión artificial y RNA	Sistema con actuadores y visión artificial	Sistema con actuadores y sensores
Detección y clasificación de figuras geométricas simples	Si	Si	No
Detección y clasificación de figuras complejas	Si	No	No
Detección de tipo de material	No	No	Si
Movimiento	Varias direcciones	Una dirección	Una dirección
Problemas ante cambios de luz	Si	Si	No
Control de calidad en base a forma	Si	No	No
Coste computacional	Alto	Medio	Bajo

Como se observa en la Tabla 25 cada sistema tiene sus ventajas y desventajas. El presente proyecto tiene como ventajas el poder transportar un objeto en múltiples

direcciones y gracias a que posee algoritmos de visión artificial basados en RNA permite detectar varios tipos de figuras dentro del rango admitido, sus desventajas son que necesita un alto coste computacional para funcionar y presenta problemas ante cambios de iluminación.

5.7. Validación de la hipótesis

- Hipótesis:

¿El sistema omnidireccional de transporte permitirá la clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido usando visión artificial en el laboratorio de Mecatrónica?

- Variable independiente:

Clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido en el laboratorio de Mecatrónica.

- Variable dependiente:

Sistema omnidireccional de transporte con visión artificial.

Para la validación de la hipótesis se utiliza el método del Chi-Cuadrado: Lo primero que se debe realizar es fijar la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis de alternativa (H_1).

- Hipótesis Nula (H_0):

El sistema omnidireccional de transporte no permitirá la clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido usando visión artificial en el laboratorio de Mecatrónica.

- Hipótesis Alternativa (H1):

El sistema omnidireccional de transporte permitirá la clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido usando visión artificial en el laboratorio de Mecatrónica.

Utilizando los valores de la Tabla 21 y la Tabla 23 se realiza la tabla de frecuencias de valores observados como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26

Frecuencia de valores observados

Frecuencia de valores observados			
Pruebas	Bien >80% & <90%	Muy Bien >=90%	Total
Resultados de la prueba con diferentes tipos de perspectivas	4	8	12
Resultados de la prueba de transporte	0	12	12
Total	4	20	24

Una vez calculadas las frecuencias de valores observados se procede a calcular la frecuencia de los valores esperados, mediante la siguiente fórmula:

$$E_{ij} = \frac{O_i * O_j}{O} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

O_i = Frecuencia observada fila

O_j = Frecuencia observada columna

E_{ij} = Frecuencia esperada

O = Total

En la Tabla 27 se muestra la frecuencia de valores esperados:

Tabla 27

Frecuencias de valores esperados

Frecuencia de valores esperados		
Pruebas	Bien >80% & <90%	Muy Bien >=90%
Resultados de la prueba con diferentes tipos de perspectivas	2	10
Resultados de la prueba de transporte	2	10

Se obtiene el valor de Chi-Cuadrado calculado mediante la ecuación:

$$X_{cal}^2 = \sum \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad \text{Ec.18}$$

En la Tabla 28 se muestran los valores obtenidos:

Tabla 28

Valores de Chi-Cuadrado

Valores de Chi-Cuadrado		
Pruebas	Bien >80% & <90%	Muy Bien >=90%
Resultados de la prueba con diferentes tipos de perspectivas	2	0.4
Resultados de la prueba de transporte	2	0.4
Total	4	0.8
Total		4.8

Ahora se procede a calcular el valor del grado de libertad:

$$V = (\text{Cantidad de filas} - 1) * (\text{Cantidad de columnas} - 1) \quad \text{Ec. 19}$$

$$V = (2 - 1) * (2 - 1)$$

$$V = 1$$

Por lo general se trabaja con un valor de significancia de $p=0.05$ lo que indica un alto rendimiento del Sistema omnidireccional de transporte con visión artificial.

En la Figura 172 para 1 grado de libertad y un valor de significancia de $p=0.05$ se obtiene el valor tabulado de: 3.84

DISTRIBUCION DE χ^2

Grados de libertad	Probabilidad										
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52
6	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59
	No significativo								Significativo		

Figura 172 Distribución de Chi-cuadrado

Para que la hipótesis sea válida es necesario que se cumpla la condición:

$$X_{calc} > X_{tab}$$

Se tiene que:

$$X_{calc} = 4.8$$

$$X_{tab} = 3.84$$

$$4.8 > 3.84$$

Por tal motivo se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula. Entonces queda verificada la hipótesis planteada ya que el sistema omnidireccional de

transporte permitirá la clasificación y control de calidad de objetos provenientes de procesos de prototipado rápido usando visión artificial en el laboratorio de Mecatrónica

5.8. Análisis económico del proyecto

En esta sección se detallan los gastos generales en la elaboración del mecanismo omnidireccional. En la Tabla 29 se muestra a detalle el valor total del diseño, construcción e implementación del mecanismo de transporte, clasificación y control de calidad mediante visión artificial.

Tabla 29

Costos de los componentes del proyecto

Cantidad	Detalle	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Sistema Electrónico y de Control			
1	Motor a pasos (9 kg.cm)	40	40
1	Motor a pasos (14 kg.cm)	50	50
1	Motor a pasos (19 kg.cm)	70	70
2	Driver BL – TB5600 - V1.2 - 4.5 A	12	24
1	Driver BL - TB6600 - V1.2 - 5 A	25	25
1	Tarjeta Arduino Uno	15	15
1	Fuente de alimentación 3DPS2415	35	35
1	Sensor infrarrojo	3	3
1	Cable de timbre (5m)	2	2
1	Bornera	0.25	0.25
1	Interruptor	1	1

CONTINÚA 

1	Cable gemelo	2	2
1	Jack	0.50	0.50
1	Canaleta (2m)	2	2
Subtotal:			269.75
Sistema de Visión Artificial			
1	Cámara web HD Genius	50	50
1	Soporte	25	25
1	Pallet	20	20
4	Pieza impresa 3D	5	20
Subtotal:			115
Banda Transportadora y Mecanismo Omnidireccional			
12	Rueda omnidireccional 125 mm R2 – 1258 – 95/N13	29	348
24	Rueda Omnidireccional 48 mm R2 – 0484 – 9001	11.50	276
1	Costo de importación ruedas	250	250
3	Eje ruedas (125 mm)	30	90
4	Eje ruedas (48 mm)	20	80
2	Eje banda transportadora	40	80
4	Cojinete	10	40
1	Soporte motor (9 kg.cm)	5	5
1	Estructura banda transportadora	30	30
1	Banda	15	15
2	Poleas motores	5	10
6	Poleas de transmisión grandes	3	18
6	Poleas de transmisión pequeñas	3	18

CONTINÚA 

4	Bandas para poleas de transmisión grandes	3	12
3	Bandas para poleas de transmisión pequeñas	2	6
1	Estructura mecanismo omnidireccional	200	200
1	Base mecanismo omnidireccional	30	30
1	Pintura	10	10
Subtotal:			1518
Herramientas y materiales Varios			50
Diseño e implementación del mecanismo omnidireccional			50
Diseño e implementación del circuito electrónico y de control			50
TOTAL			\$ 2052.75

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El mecanismo omnidireccional transportó 3 tipos de piezas, entregando cada una en su depósito, como se observa en el Capítulo V, sin que la pieza sufra daños al ser transportada con un 100% de efectividad.
- El sistema de visión artificial trabaja adecuadamente bajo iluminación natural, la misma que es muy fácil de conseguir y adecuar como se observó en la sección 5.2.2, así mismo el sistema presenta limitaciones o mal funcionamiento en ambientes en los cuales se cambie las condiciones de iluminación constantemente.
- La clasificación dentro del sistema, está regida por una red neuronal que consta de 256, 32 y 5 neuronas en sus capas de entrada, oculta y salida respectivamente con un 89% de efectividad, debido a que para asegurar la identificación de una pieza en buen estado se necesitan descriptores específicos de forma, que solo mediante el entrenamiento de la red neuronal se puede discretizar e identificar.
- El sistema de transmisión del mecanismo omnidireccional, es directo, es decir está acoplado por poleas de la misma dimensión en cada extremo, de esta forma se

consigue que la velocidad de cada motor sea la velocidad de cada eje. La velocidad con la que se mueve el pallet por cada uno de los ejes es constante.

- El control del sistema (usuario - máquina) está dado por una interfaz gráfica, la misma que presenta un banco de pruebas de movimientos de los motores, que es obligatorio de realizar antes de utilizar el sistema. Cada acción está ligada a un botón dentro de la interfaz y no se puede presionar otro si existe un proceso en marcha, asegurando que no se presenten mal funcionamientos en el software de control.
- El software utilizado para la implementación de la red neuronal, así como el diseño de la interfaz gráfica es OpenCV, debido a que tiene librerías que facilitan la implementación de sistemas de visión artificial basados en redes neuronales.
- Los sistemas omnidireccionales presentan mayores prestaciones, ya que clasifica y transporta al mismo tiempo a diferencia de los sistemas convencionales que realizan estos procesos por separado.

6.2. Recomendaciones

- Investigar acerca de la instalación de módulos omnidireccionales que constan de tres ruedas configuradas a 60°, ya que también permiten mover objetos en diferentes direcciones.

- Se podría desarrollar un sistema que permita elevar sólo las ruedas que se encuentran en movimiento y bajar las que no se están utilizando para lograr movimientos más fluidos.
- Implementar un motor por eje para que el sistema tenga mayor fuerza de empuje sobre el pallet.
- Investigar métodos de programación para la red neuronal que permita entrenar al sistema automáticamente cuando se requiera clasificar nuevas piezas.
- Mantener bien limpio el pallet ya que cualquier agente externo en la superficie del mismo puede generar ruido al momento de capturar la imagen dentro de la visión artificial.
- Tomar en cuenta que existen momentos en los cuales el pallet puede trabarse como se ve en el Capítulo V, en dicho caso es necesario para el sistema.
- El sistema está configurado para clasificar 3 tipos de piezas, pero si el usuario desea clasificar más tiene que entrenar a la red neuronal para más figuras y configurar las combinaciones a la nueva pieza.

- Tener en cuenta el enfoque de la cámara antes de utilizar la máquina, ya que si no se encuentra bien enfocada se pueden producir errores o ruidos en la imagen capturada.
- Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario trabajar en ambientes iluminados donde no existan cambios de luz constante, además no utilizar iluminación directa sobre la pieza a clasificar.
- Realizar las pruebas de movimiento de la forma más conciente posible, aunque son obligatorias por el sistema, depende del criterio del operador analizar si el sistema está en buenas condiciones para funcionar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arduino. Recuperado el 13 de noviembre del 2017. Obtenido de

<https://www.arduino.cc/en/Main/Education>

Cárdenas , E., & Morales , L. (2015). La estereoscopía, métodos y aplicaciones. *Revista Científica General José María Córdova*, 201-219.

Casas, J. (2004). *Tutorial de motores a paso*. México, D. F. : Tumbona.

Caviedes, A. Recuperado el 27 de noviembre del 2017. *Blogspot*. Obtenido de

<http://urdinstenalco.blogspot.com/2017/01/el-ano-del-arduino-en-urdi.html>

Chacón, M. (2007). *Procesamiento Digital de Imágenes*. México, D. F. : Trillas.

Creus, A. (2007). *Neumática e hidráulica*. México, D. F. : Alfaomega.

Dima3D. Recuperado el 31 de noviembre del 2017. Obtenido de

<http://www.dima3d.com/defectos-en-piezas-fabricadas-por-impresion-3d-fff-causas-y-soluciones/>

DIPAC. Recuperado el 06 de diciembre del 2017. Obtenido de

<http://www.dipacmanta.com/ejes/ejes-aisi-1018/aisi-1018-transmision>

DIY Projects. Recuperado el 08 de diciembre del 2017. Obtenido de

<http://diyprojects.eu/wiring-and-running-tb6600-stepper-driver-with-arduino/>

Electronilab. Recuperado el 11 de diciembre del 2017. Obtenido de

<https://electronilab.co/tienda/driver-microstepper-motor-paso-paso-tb6600-0-2-5a-12-48vdc/>

Ensalco. Recuperado el 15 de diciembre del 2017. *Omni Conveyor*. Obtenido de <http://www.ensalco.com/content/omni-conveyor.asp>

García, E. (2010). *Visión artificial*. Cataluña: Herder.

Genius. Recuperado el 15 de diciembre del 2017. Obtenido de <http://pe.geniusnet.com/product/facecam-1000x>

Habasit. Recuperado el 22 de diciembre del 2017. *Catálogo cintas transportadoras*. Obtenido de <http://www.habasit.com/es/bandas-transportadoras.htm>

Ideas Sólidas. Recuperado el 04 de enero del 2018. Obtenido de <http://www.ideassolidas.com/>

ingeniatic. Recuperado el 05 de enero del 2018. Obtenido de <http://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/394-c%C3%A1mara-estereosc%C3%B3pica.html>

Ingeniería Mecafenix. Recuperado el 11 de enero del 2018. Obtenido de <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

Logitech. Recuperado el 06 de enero del 2018. Obtenido de <https://www.logitech.com/en-us/video/webcams>

Match, D. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. Santa Fe: Nativa.

- Mendieta, D. (2003). *Reconocimiento de Objetos Bidimensionales en Imágenes mediante la Transformada de Distancia utilizando Matlab*. Tesis de pregrado: Universidad de las Américas, Puebla.
- Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., & Cuartero, J. (1998). *Los transportes en la Ingeniería Industrial (Teoría)*. Zaragoza: Reverté.
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales*. México, D. F. : Pearson.
- Nacelle, A. (2009). *Redes neuronales artificiales*. Montevideo: Contexto.
- OpenCV. Recuperado el 15 de enero del 2018. Obtenido de <https://opencv.org/about.html>
- Pajares, G., & de la Cruz, J. (2002). *Visión por computador*. México, D. F. :: Alfaomega.
- Palazzesi, A. Recuperado el 16 de enero del 2018. *NEOTEO*. Obtenido de <https://www.neoteo.com/ccd-vs-cmos/>
- Parmar, J., & Savant, C. (2014). *Selection of wheels in robotics*. Chicago: Tribune.
- Provecuador. Recuperado el 19 de enero del 2018. *Bandas Transportadoras y Bandas de Transmisión*. Obtenido de <http://provecuador.com.ec/bandas-transportadoras.html>
- Rellwin. Recuperado el 22 de enero del 2018. *Ningbo Rellwin Industry*. Obtenido de <http://spanish.cn-chains.cc/i-knowledge-706518/history-for-conveyor-belt-706554.html>
- Rexon. (2010). *Cálculo de transmisiones*. Colombia: Cekt.

Roldán, J. (2014). *Motores de corriente continua*. España: Paraninfo.

Rotacaster. Recuperado el 23 de enero del 2018. Obtenido de

<https://www.rotacaster.com.au/shop/rotacaster-wheels/index>

Sánchez, J., Fernández, A., & Llorente, J. (2004). *Técnicas de prototipado rápido*.

España: Paraninfo.

Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of digital image processing*.

Hoboken: Wiley Blackwell.

Stratasys. Recuperado el 30 de enero del 2018. Obtenido de

<http://www.stratasys.com/es/resources/rapid-prototyping>

Tórner, J. (2012). *Control de calidad mediante visión artificial*. Valencia: Lamiart.

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **BARRIONUEVO SALAZAR, ERICK SANTIAGO** y **NAVAS ESCUDERO, BRYAN ALBERTO**.

En la ciudad de Latacunga, a los **12 días del mes de julio del 2018**.

Ing. Nathaly Rea
DIRECTORA DEL PROYECTO



Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO