



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 PROTOTIPO DE SISTEMA FLEXIBLE DE ALMACENAMIENTO / RECUPERACIÓN (AS /RS) AUTOMATIZADO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO DIMENSIONAL DE MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE ESPACIOS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.

AUTORES: CÁRDENAS RUBIO, JHOSTIN PATRICIO
DÍAZ QUINGA, JONNATHAN RAÚL

DIRECTOR: MS.C. GORDÓN GARCÉS, ANDRÉS MARCELO

LATACUNGA

2018



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA FLEXIBLE DE ALMACENAMIENTO / RECUPERACIÓN (AS /RS) AUTOMATIZADO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO DIMENSIONAL DE MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE ESPACIOS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”*** fue realizado por los señores ***Cárdenas Rubio, Jhostin Patricio*** y ***Díaz Quinga, Jonnathan Raúl*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, octubre del 2018

Firma:

**Ing. Andrés Marcelo Gordón Garcés
DIRECTOR**



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Cárdenas Rubio, Jhostin Patricio** y **Díaz Quinga, Jonnathan Raúl**, declaramos que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA FLEXIBLE DE ALMACENAMIENTO / RECUPERACIÓN (AS /RS) AUTOMATIZADO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO DIMENSIONAL DE MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE ESPACIOS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”** Es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, octubre del 2018

Firma:

**Jhostin Patricio Cárdenas
Rubio**

C.C.: 0504265430

Firma:

Jonnathan Raúl Díaz Quinga

C.C.: 1720584364



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Cárdenas Rubio, Jhostin Patricio** y **Díaz Quinga, Jonnathan Raúl** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación ***“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA FLEXIBLE DE ALMACENAMIENTO / RECUPERACIÓN (AS /RS) AUTOMATIZADO MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL PARA EL RECONOCIMIENTO DIMENSIONAL DE MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE ESPACIOS, PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, octubre del 2018

Firma:

Jhostin Patricio Cárdenas Rubio

C.C.: 0504265430

Firma:

Jonnathan Raúl Díaz Quinga

C.C.: 1720584364

DEDICATORIA

El presente trabajo es el resumen de un cúmulo de conocimientos adquiridos en las aulas de clase de nobles instituciones como la Unidad Educativa San José Lasalle, la Unidad Educativa Hermano Miguel y la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, es el resultado del esfuerzo de mis amados padres Patricio Cárdenas y Diana Rubio que me han brindado todo lo necesario a lo largo de este trayecto de vida, es el producto de la tenacidad y constancia que no hubiera podido adquirir sin el apoyo constante de cada uno de mis familiares y amigos, sobre todo es el reflejo de la voluntad de Dios que día a día me ha bendecido con la presencia de personas especiales como mi hermana Dianita, mi tía María Rubio, mi abuelito Julio Alberto Rubio Espinoza y de todas las personas quienes han sido su instrumento para bendecir mi vida, es por ello que dedico este trabajo a cada uno de ellos.

Jhostin

En primer lugar, dedico el presente proyecto de grado a Dios por haberme guiado con su infinita bondad, cariño y sabiduría, permitiéndome así poder culminar esta gran etapa en mi vida. Además, una dedicatoria especial a mis amados padres, Raúl y Marthita que hoy ven reflejado el esfuerzo que día a día realizan para ver en mí una persona de bien, es un orgullo para mí tenerlos como mis padres. A mi querido hermano Jefferson quien me ha brindado su cariño y apoyo, siendo así parte fundamental para la culminación de este proyecto. A todos mis amigos y familiares que de una u otra manera me han apoyado y han hecho posible que este trabajo se termine con éxito.

Jonnathan

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer la infinita bondad de Dios quien ha permitido culminar este paso importante en nuestras vidas, de igual manera agradecer profundamente el esfuerzo de nuestros padres y hermanos que han hecho todo lo posible para que consigamos culminar con éxito nuestros estudios superiores.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga será merecedora de nuestra eterna gratitud por formarnos académicamente bajo la tutela de grandes maestros y personas durante este tiempo. Especialmente quisiéramos dar las gracias al Ing. Andrés Gordón MSc. quien ha guiado profesionalmente el presente trabajo, a los Ingenieros: Vicente Hallo, Nathaly Rea y Darío Mendoza quienes nos han brindado su ayuda a lo largo de toda la carrera.

Finalmente, a los grandes amigos que hemos cosechado durante esta etapa, que han sido compañeros de alegrías y lucha durante este arduo, pero gratificante ciclo, que culmina con el honor de poder graduarnos como Ingenieros en Mecatrónica.

GRACIAS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación	2
1.4. Importancia	3
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Hipótesis.....	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Almacenamiento convencional	6
--	---

2.1.1. Características de los sistemas de almacenamiento.....	6
2.1.2. Elementos básicos de los sistemas de almacenamiento convencional.	6
2.1.3. Funciones de los sistemas de almacenamiento.	7
2.1.4. Ventajas de los sistemas de almacenamiento	8
2.1.5. Métodos de almacenaje según el flujo de entrada/salida.	9
2.1.6. Soportes para cargas.....	9
2.1.7. Tecnologías aplicadas a sistemas de almacenamiento convencional.....	10
2.1.8. Sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS).....	11
2.1. Características morfológicas de robots.....	19
2.2. Mecanismos de transmisión de movimiento	20
2.4. Visión Artificial (VA).....	23
2.4.1. Definición	23
2.4.2. Dispositivo utilizado para VA	23
2.4.3. Procesamiento digital de imágenes (PDI).....	25
2.4.4. Etapas del procesamiento de imágenes.....	26

CAPÍTULO III

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

3.1. Diseño del sistema mecánico	27
3.1.1. Diseño de almacenadores	27
3.1.2. Selección del tipo de configuración morfológica del Robot	28
3.1.3. Selección del tipo de transmisión de movimiento.....	28
3.1.4. Selección de componentes para el sistema de transmisión	29
3.1.5. Selección de motores	42
3.1.6. Diseño estructural del eje de movimiento X del robot.....	45
3.1.7. Diseño de pallets	46

3.1.8. Diseño de horquillas	50
3.1.9. Diseño del eje X.....	57
3.1.10. Diseño de la base del AS/RS	62
3.2. Diseño Electrónico y Selección del Sistema de Control	66
3.2.1. Selección de la Fuente de Alimentación	66
3.2.2. Selección de motores	67
3.2.3. Selección de drivers.....	68
3.2.4. Selección del sistema de control.....	70
3.2.3 Diseño del Circuito Electrónico.....	73
3.2.5 Selección del tipo de cámara.....	75
3.3. Programación de algoritmos de visión artificial para el reconocimiento de dimensiones.....	77
3.4. Descripción general del sistema de visión artificial para la captura e identificación de dimensiones	78

CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE COMPONENTES

4.1. Construcción mecánica.....	80
4.1.1. Construcción de los módulos de almacenamiento	80
4.1.2. Ensamble de la base de la estructura	80
4.1.3. Implementación de las ruedas de apoyo.....	81
4.1.4. Ensamble del Robot Cartesiano	81
4.1.5. Acoplamiento de los motores.....	83
4.1.6. Construcción de las horquillas	83
4.1.7. Implementación de los finales de carrera.....	84
4.1.8. Cableado del AS/RS	85
4.1.9. Acabados finales del AS/RS	85

4.1.10. Implementación de la zona para visión artificial	87
4.2. Configuración de la tarjeta Arduino Uno.....	88
4.3. Configuración de los finales de carrera	90
4.3.1. Conexión de los finales de carrera para el eje X.....	90
4.3.2. Conexión de los finales de carrera para el eje Y	91
4.3.3. Conexión de los finales de carrera para el eje Z	92
4.3.4. Elaboración de la placa para el circuito de filtrado de los finales de carrera...	92
4.4. Configuración del Robot mediante el software “Universal GCode Sender”	93
4.4.1. Configuración para la comunicación serial.....	94
4.5. Implementación del Sistema de Visión Artificial	96
4.5.1. Adquisición de imágenes	96
4.5.2. Pre-Procesamiento de imágenes	97
4.5.3. Encontrar Contornos.....	98
4.5.4. Creación de un cuadro Delimitador.....	99
4.5.5. Ordenamiento de contornos.....	100
4.5.6. Establecer dimensiones en cantidad de pixeles.....	101
4.5.7. Comparación de pixeles con la referencia	101
4.5.8. Cálculos matemáticos para el escalado en la medición	102
4.5.9. Impresión de resultados.....	103
4.6. Comparación de dimensiones para el almacenamiento de figuras.	103
4.6.1. Algoritmos de programación para la comparación de dimensiones.....	105
4.7. Implementación de algoritmos de programación para el funcionamiento del mecanismo S/R.	106
4.8. Implementación de lenguaje de programación G	107
4.9. Algoritmos de comunicación y traspaso de comandos G a lenguaje C++	110
4.9.1. Configuración para la comunicación serial C++ con Arduino	110

4.9.2. Traspaso de códigos G a lenguaje C++	110
4.9.3. Creación de las rutinas de almacenamiento y recuperación en C++	111
4.10. Implementación del sistema de registro de datos	113
4.11. Creación de la Interfaz Gráfica HMI	116

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

5.1. Pruebas y análisis de resultados del sistema.....	121
5.1.1. Pruebas de medición de cubos regulares.	121
5.1.2. Pruebas medición figuras irregulares.	130
5.1.3. Pruebas de error en la medición.	135
5.1.4. Pruebas de precisión y repetibilidad del manipulador.	135
5.1.5. Pruebas de almacenamiento sistema AS/RS vs Operario.	136
5.1.6. Pruebas optimización de espacios de almacenamiento.	141
5.2. Análisis de costos	143
5.3. Resumen de características obtenidas en las pruebas	147
5.4. Validación de la hipótesis	148

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones	152
6.2. Recomendaciones	153
6.3. Trabajos Futuros.....	154
Bibliografía	156
ANEXOS.....	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un sistema convencional	7
Figura 2. Símil de un sistema de almacenamiento	8
Figura 3. Estándares de paletas según Normas ISO.....	10
Figura 4. Componentes de un AS/RS	13
Figura 5. AS/RS De unidad de carga	14
Figura 6. Deep-Lane AS/RS.....	15
Figura 7. AS/RS de Hombre a Bordo	15
Figura 8. AS/RS de mini carga	16
Figura 9. Sistema de Almacenamiento AS/RS de alta densidad Westfalia.....	17
Figura 10. AS/RS de tipo transelevador G.I.EICOM.....	18
Figura 11. Modelo AS/RS System Logistics	19
Figura 12. Cámara Web Logitech.....	24
Figura 13. Sistema de Referencia de acuerdo a la resolución.....	24
Figura 14. Funcionamiento Cámara Web.....	25
Figura 15. Distribución de Almacenadores.....	27
Figura 16. Montaje Fijo-fijo.....	31
Figura 17. Diagrama de carga axial en montaje horizontal.....	36
Figura 18. Diagrama de carga axial en montaje horizontal.....	39
Figura 19. Gráfica Torsión-Velocidad motor a pasos NEMA 23	43
Figura 20. Curva Velocidad vs. Torque motor a pasos NEMA 23.....	44
Figura 21. Dimensión frontal del pallet	46
Figura 22. Datos obtenidos mediante MdSolids	47
Figura 23. Resultado del análisis estático del pallet.	49
Figura 24. Horquilla.....	50

Figura 25. Resultados obtenidos de momento flector máximo	51
Figura 26. Flexión en un extremo	52
Figura 27. Análisis estático de la horquilla	55
Figura 28. Factor de seguridad de la horquilla	56
Figura 29. Flexión máxima	56
Figura 30. Propiedades mecánicas Tubo de Acero A500.....	58
Figura 31. Momento flector máximo del soporte eje x	59
Figura 32. Factor de seguridad de la viga	60
Figura 33. Factor de seguridad de la estructura base del eje x	61
Figura 34. Datos de flexión máxima eje x.....	62
Figura 35. Ensamble mecánico completo AS/RS	65
Figura 36. Factor de seguridad de la base del AS/R	65
Figura 37. Fuente de Alimentación Conmutada AC/DC (R2-6BUR-PGPH).....	67
Figura 38. Motor a pasos NEMA 23	68
Figura 39. Driver BL TB6600.....	69
Figura 40. Diagrama de conexión Driver BL TB6600	70
Figura 41. Pines de conexión CNC Shield	71
Figura 42. Distribución de pines de Arduino a CNC Shield.....	73
Figura 43. Circuito a implementarse.....	74
Figura 44. Final de carrera seleccionado	75
Figura 45. Cámara Web.....	75
Figura 46. Representación de la longitud focal.....	76
Figura 47. Ejemplo de visión en 3D.....	78
Figura 48. Descripción general del sistema de visión artificial	79
Figura 49. Módulos de Almacenamiento	80
Figura 50. Base de la estructura	81

Figura 51. Ruedas de apoyo	81
Figura 52. Ensamble del eje Y	82
Figura 53. Ensamble del eje X y Z	82
Figura 54. Ensamble eje Z	82
Figura 55. Acoplamiento de motores.....	83
Figura 56. Construcción de las horquillas mediante corte por plasma	83
Figura 57. Acople de las horquillas en el eje Z.....	84
Figura 58. Acople de los finales de carrera	84
Figura 59. Cableado de los componentes	85
Figura 60. Pintado de la estructura	86
Figura 61. Instalación de planchas de acrílico.....	86
Figura 62. Instalación de la caja de control	87
Figura 63. Zona para visión artificial.....	87
Figura 64. Selección de la placa en el software de Arduino	88
Figura 65. Selección del puerto COM.....	89
Figura 66. Archivo GRBL	89
Figura 67. Código firmware GRBL	90
Figura 68. Finales de carrera del eje X.....	91
Figura 69. Finales de carrera eje Y	91
Figura 70. Finales de carrera eje Z	92
Figura 71. Placa circuito de filtrado	93
Figura 72. Interfaz Universal GCode Sender.....	93
Figura 73. Parámetros de Comunicación Serial	94
Figura 74. Parámetros de configuración GCode Sender	95
Figura 75. Parámetros de configuración GCode Sender	95
Figura 76. Algoritmos para adquisición de imágenes	96

Figura 77. Algoritmo de conversión a escala de grises	97
Figura 78. Proceso de dilatación de imágenes.....	97
Figura 79. Algoritmo para encontrar contornos en una imagen	98
Figura 80. Resultado de encontrar contornos en una imagen	98
Figura 81. Algoritmo para delimitación de contornos.....	98
Figura 82. Representación de contornos despreciables.....	99
Figura 83. Imagen sin ruido.....	99
Figura 84. Cuadro delimitador alrededor de contornos encontrados	100
Figura 85. Estructura del comando SORT.....	100
Figura 86. Algoritmo de ordenamiento de contornos	101
Figura 87. Determinación de píxeles de una figura.....	101
Figura 88. Ubicación de la figura de referencia	102
Figura 89. Algoritmo para seleccionar el primer contorno.....	102
Figura 90. Algoritmos para mostrar las dimensiones de la figura	103
Figura 91. Resultado del proceso de visión artificial.....	103
Figura 92. Captura frontal	104
Figura 93. Captura superior	104
Figura 94. Medidas de almacenadores en Qt Creator	105
Figura 95. Algoritmos de comparación de medidas.....	105
Figura 96. Diagrama de flujo del funcionamiento general del AS/RS	107
Figura 97. Rutina para el almacenamiento.....	107
Figura 98. Rutina para la recuperación	108
Figura 99. Parámetros de comunicación de Qt Creator con Arduino.....	110
Figura 100. Obtención de coordenadas de almacenamiento.....	111
Figura 101. Valores de las coordenadas X, Y	111
Figura 102. Algoritmos para enviar a HOME al AS/RS.....	112

Figura 103. Algoritmo de rutina del porta pallet	112
Figura 104. Rutina final para el almacenamiento	113
Figura 105. Algoritmo para el reconocimiento de imágenes existentes	114
Figura 106. Algoritmos para almacenar imágenes en la base de datos	114
Figura 107. Directorio con las imágenes almacenadas	115
Figura 108. Captura frontal almacenada en la base de datos	115
Figura 109. Captura superior almacenada en la base de datos	116
Figura 110. Ventana principal de la interfaz gráfica.....	116
Figura 111. Ventana secundaria del HMI (almacenamiento)	117
Figura 112. Ventana secundaria del HMI (recuperación)	117
Figura 113. Pantalla con las imágenes de la pieza a almacenar	118
Figura 114. Información de la pieza a ser almacenada	119
Figura 115. Elección del estante A o B.....	120
Figura 116. Elección de la posición de la pieza a recuperar	120
Figura 117. Cubo naranja.....	121
Figura 118. Cubo amarillo	122
Figura 119. Cubo celeste	123
Figura 120. Cubo verde	124
Figura 121. Cubo rosado.....	125
Figura 122. Cubo morado	126
Figura 123. Gráfico de errores en X (Unidad: mm).....	127
Figura 124. Gráfico de errores en Y (Unidad: mm).....	127
Figura 125. Gráfico de errores en Z (Unidad: mm).....	127
Figura 126. Cubo regular de 50x100x50 mm	128
Figura 127. Cubo regular de 50x150x50 mm	129
Figura 128. Comparación del promedio de errores	130

Figura 129. Pieza irregular 1 (pequeño naranja)	131
Figura 130. Pieza irregular 2 (pequeño verde)	132
Figura 131. Pieza irregular 3 (grande verde)	132
Figura 132. Pieza irregular 4 (hueca azul pequeña)	133
Figura 133. Promedio de errores de piezas irregulares	134
Figura 134. Objetos usados para la prueba humano vs. máquina	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Transacciones de un AS/RS</i>	11
Tabla 2	<i>Descripción de los componentes de un AS/RS</i>	13
Tabla 3	<i>Características Morfológicas de Robots</i>	20
Tabla 4	<i>Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por bandas.</i>	21
Tabla 5	<i>Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por cadenas</i>	21
Tabla 6	<i>Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por husillos de potencia</i>	22
Tabla 7	<i>Etapas del Procesamiento de Imágenes</i>	26
Tabla 8	<i>Husillos de bolas de precisión</i>	30
Tabla 9	<i>Diámetros de husillos</i>	30
Tabla 10	<i>Paso de rosca de acuerdo al diámetro del eje de husillo</i>	31
Tabla 11	<i>Factores de métodos de montaje</i>	32
Tabla 12	<i>Diámetros de rosca</i>	33
Tabla 13	<i>Factores de acuerdo con el método de montaje</i>	35
Tabla 14	<i>Fuerza de resistencia de la superficie de la guía lineal</i>	38
Tabla 15	<i>Flexión máxima recomendados</i>	53
Tabla 16	<i>Propiedades tubos cuadrados</i>	57
Tabla 17	<i>Características fuente de Alimentación conmutada AC/DC</i>	67
Tabla 18	<i>Características técnicas Motor a pasos NEMA 23</i>	68
Tabla 19	<i>Especificaciones técnicas driver BL TB6600</i>	69
Tabla 20	<i>Características CNC Shield</i>	72
Tabla 21	<i>Características Arduino UNO</i>	72
Tabla 22	<i>Especificaciones técnicas de cámaras web</i>	77
Tabla 23	<i>Dimensiones de los espacios de almacenamiento</i>	104
Tabla 24	<i>Comandos G para realizar la rutina de almacenamiento</i>	108

Tabla 25 <i>Pruebas de medidas del cubo naranja</i>	122
Tabla 26 <i>Pruebas de medidas del cubo amarillo</i>	122
Tabla 27 <i>Pruebas de medidas del cubo celeste</i>	123
Tabla 28 <i>Pruebas de medidas del cubo verde</i>	124
Tabla 29 <i>Pruebas de visión del cubo rosado</i>	125
Tabla 30 <i>Pruebas de visión del cubo morado</i>	126
Tabla 31 <i>Pruebas de visión del cubo regular de 50x100x50</i>	128
Tabla 32 <i>Pruebas de visión del cubo de 50x150x50</i>	129
Tabla 33 <i>Pruebas de visión de la pieza irregular 1</i>	131
Tabla 34 <i>Pruebas de visión de la pieza irregular 2</i>	132
Tabla 35 <i>Pruebas de visión de la pieza irregular 3</i>	133
Tabla 36 <i>Pruebas de visión de la pieza irregular 4</i>	133
Tabla 37 <i>Pruebas de errores de medición</i>	135
Tabla 38 <i>Pruebas de precisión</i>	136
Tabla 39 <i>Prueba de repetibilidad</i>	136
Tabla 40 <i>Prueba guardado automático</i>	137
Tabla 41 <i>Prueba Operario #1</i>	137
Tabla 42 <i>Prueba Operario #2</i>	138
Tabla 43 <i>Prueba Operario #3</i>	138
Tabla 44 <i>Prueba Operario #4</i>	139
Tabla 45 <i>Prueba Operario #5</i>	139
Tabla 46 <i>Pruebas de optimización de espacios</i>	141
Tabla 47 <i>Resumen de costos del proyecto</i>	143
Tabla 48 <i>Cuadro resumen características de pruebas de visión y manipulador</i>	147
Tabla 49 <i>Cuadro resumen características de funcionamiento sistema AS/RS</i> ...	147

Tabla 50 <i>Frecuencia de valores observados</i>	149
Tabla 51 <i>Frecuencia de valores esperados</i>	150
Tabla 52 <i>Valores de probabilidad</i>	151

RESUMEN

El presente trabajo de titulación diseña e implementa un prototipo de sistema de almacenamiento y recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial para reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento dependiendo de las dimensiones de los objetos a guardar en el mismo. El proyecto se divide en 3 áreas importantes que son el diseño e implementación mecánica, eléctrica/electrónica y control. Para el diseño e implementación de la estructura se ha tomado como referencia dimensiones máximas de 150x150x150 [mm] en los objetos a guardar, teniendo como resultado dos módulos de almacenadores con 32 espacios de almacenaje cada uno, divididos en 4 tipos diferentes de espacios, haciendo un total de 64 espacios de almacenamiento. De igual forma se utiliza husillos de potencia para la transmisión de movimiento en los ejes X, Y y Z. En el área eléctrica/electrónica y de control se seleccionaron motores a paso con sus respectivos drivers y alimentación, mientras que para el control de la máquina se decidió operar sus movimientos por medio de códigos G, usando la placa Arduino con el software GRBL. De igual manera, para el proceso de visión artificial se usó OpenCV usando el software QtCreator para programar y unir el control del manipulador, proceso de visión artificial, procesamiento de datos e interfaz gráfica. El sistema AS/RS implementado tiene como función almacenar objetos con diferentes dimensiones, colores y formas, clasificando los mismos únicamente por su dimensión con la premisa de optimizar espacios. Para validar el funcionamiento de la máquina se han elaborado y realizado pruebas para sistema de visión artificial, manipulador cartesiano y pruebas integrales para todo el sistema teniendo como resultado una fiabilidad del 90.63%.

PALABRAS CLAVE:

- **SISTEMA AUTOMATIZADO DE ALMACENAMIENTO Y RECUPERACIÓN**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**
- **MANIPULADOR ROBÓTICO CARTESIANO**
- **ALMACEN - OPTIMIZACIÓN DE ESPACIOS**

ABSTRACT

This certification work is to design and implement a prototype of an automated storage and recovery system AS / RS by means of artificial vision for dimensional recognition of storage modules depending on the dimensions of the objects to be stored in it. The project is divided into 3 important areas that are mechanical, electrical / electronic and control. For design and implementation of structure, maximum dimensions of 150x150x150 [mm] have been taken as reference in the objects to be stored, resulting in two storage modules with 32 storage spaces each, divided into 4 different types of spaces, making a total of 64 storage spaces. Likewise, it was decided to use power screws for the transmission of movement in the X, Y and Z axes. In the electrical / electronic and control area, motors were selected step by step with their respective drivers and power supply, while for the control of the machine it was decided to operate its movements by means of G codes, using the Arduino board with the GRBL software. In the same way for the artificial vision process, OpenCV was used using the QtCreator software to program and integrate the manipulator control, artificial vision process, data processing and graphic interface. The implemented AS / RS system has the objective of storing objects with different dimensions, colors and shapes, classifying them only by their dimension with the premise of optimizing spaces. To validate the operation of the machine have been developed and performed tests for artificial vision system, cartesian manipulator and comprehensive tests for the entire system resulting in a reliability of 90.63%.

KEYWORDS:

- **AUTOMATED STORAGE AND RECOVERY SYSTEM**
- **ARTIFICIAL VISION**
- **CARTESIAN ROBOTIC MANIPULATOR**
- **WAREHOUSE - OPTIMIZATION OF SPACES**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

La automatización dirigida a sistemas de almacenamiento y recuperación es un tema que se encuentra en auge en la industria a nivel mundial, esta tecnología es aplicada principalmente en empresas con gran capacidad económica por el costo que implica su adquisición. En Ecuador son muy pocas las industrias que disponen de un AS/RS automatizado ya sea por resistencia o incredulidad con respecto a la eficiencia y eficacia de los nuevos sistemas de almacenamiento y recuperación, por la priorización de inversión en manufactura frente a los procesos de almacenamiento, o el complejo panorama de escasa y costosa oferta de entidades que se dedican a la automatización de sistemas AS/RS.

Tomando en cuenta que antes de automatizar un sistema de almacenaje y recuperación es necesario llevar a cabo un estudio de las necesidades particulares de cada sistema, se presenta la posibilidad de contar con un sistema AS/RS que pueda adaptarse a distintas dimensiones que posean los módulos de almacenamiento de acuerdo al objeto que se va a almacenar, de esta manera dar solución al problema logístico y económico de implementar un sistema AS/RS diferente para cada tipo de producto. De igual manera, el proceso de registro tradicional presenta dificultades sujetas al error humano, por esto es viable que el AS/RS posea la capacidad de recibir la información del objeto a almacenar y poder clasificarlos de acuerdo a dicha información generando un histórico para una posterior reutilización de los datos guardados.

En el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga se presenta la necesidad de contar con un sistema de

almacenamiento y recuperación AS/RS que se adapte a los requerimientos de flexibilidad y optimización de espacios para formar parte de la nueva celda de manufactura a implementarse, pues el proceso de manufactura al tener la posibilidad de implementar diferentes tecnologías seguramente brindará la opción de producir diferentes tipos y tamaños de productos.

1.2. Antecedentes

Los sistemas AS/RS son los productos más utilizados en industrias cuando se necesita almacenar gran variedad de referencias paletizadas de cada producto, ya que permite el acceso directo y unitario a cada paleta almacenada, además puede adaptarse a cualquier tipo de carga en lo que se refiere a peso y volumen. (López, 2016)

En Colombia se ha desarrollado un sistema para la actualización automática de inventarios del sistema de almacenamiento automático AS/RS del Centro Tecnológico de Automatización Industrial CTAI, este sistema de almacenamiento utiliza visión artificial y tecnología de punta, su principal función es reducir tiempos y costos de producción. Además, cuenta con un inventario lo cual permite reducir hasta 15 minutos en la búsqueda de productos. (Laurence, 2013)

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga también cuenta con un sistema de almacenamiento y recuperación (AS/RS), el mismo tiene la capacidad de detectar un objeto y almacenarlo, o a su vez conocer la ubicación del mismo. (Pulloquina, 2014)

Cabe recalcar que este par de ejemplos están ideados para tamaños fijos en lo que respecta a objetos a almacenar, por lo cual si fuere necesario guardar objetos de mayor tamaño los mismos no están en la capacidad de ser almacenados, haciendo necesario una reprogramación del sistema AS/RS, o a su vez si son muy pequeños existiría pérdida de espacios.

1.3. Justificación

El laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga no cuenta con un sistema de almacenamiento y recuperación

AS/RS impidiendo que los estudiantes realicen prácticas relacionadas con este tipo de sistemas, de igual manera ante la propuesta de implementar en el laboratorio una celda de manufactura que integre diferentes tecnologías de manufactura es necesario contar con un sistema de almacenamiento y recuperación AS/RS que se adapte a los requerimientos de dicho proyecto.

En el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, se plantea crear una celda de manufactura con la posibilidad de emplear una extensa gama de tecnologías de prototipado, por lo cual la flexibilidad de producción de la celda será grande produciendo distintos tipos y tamaños de productos, haciendo necesario disponer de un sistema de almacenamiento y recuperación AS/RS que pueda funcionar ante estos requerimientos.

1.4. Importancia

Los altos costos y baja oferta de sistemas AS/RS se traduce en una escasa implantación de estos sistemas en la industria ecuatoriana, sumando a esto la crisis económica y falta de inversión en la industria privada del Ecuador. La premisa actual es abaratar costos y optimizar recursos, por esto un sistema AS/RS que pueda adaptarse a distintas dimensiones de módulos de almacenamiento rectangulares planea incentivar la implementación de estos sistemas en la industria y por ende profundizar en las investigaciones del tema.

La eficiencia y eficacia son sinónimos en la automatización de procesos de almacenaje y recuperación de objetos. Como afirma Vargas L. (2010), vicepresidente de Logística y Tecnología de Almagran - Almacenar:

Automatizar no es una moda; no se justifica automatizar por automatizar. Existen diferentes niveles de automatización que dan la oportunidad de encauzar un plan sostenible de mejoramiento. Automatizar es, en muchos casos, una necesidad, pero antes se requiere un estudio serio del proceso en el que se consideren los detalles y se analice el mayor número de posibilidades desde el punto de vista técnico y

económico, para definir si es viable, así como el grado en el que se debe implementar.

Los autores Stewart (2011) y Pérez (2013), coinciden en que la automatización de una bodega puede entenderse de muchas maneras, pero su objetivo debe apuntar a disminuir el tiempo de desplazamiento de mercancías y personas por la bodega, duplicar la velocidad de operación, optimizar el espacio en los almacenes en las tres dimensiones (alto, ancho y largo), reducir o eliminar la intervención humana requerida para realizar estas actividades, mejorar la eficiencia por medio de un ahorro en los costos laborales, sobre todo cuando el costo de la mano de obra está en aumento, hacer del almacenamiento un proceso más ágil y preciso. También, la automatización está enfocada a mejorar la calidad del producto a entregar; asimismo el aumentar la seguridad y reducir el riesgo de accidentes puede ser un parámetro importante a la hora de tomar la decisión de automatizar.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de sistema flexible de almacenamiento recuperación (AS /RS) automatizado mediante visión artificial para el reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios, para el Laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca de sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados.
- Implementar un sistema de reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios mediante el método de visión artificial.
- Diseñar e implementar una estructura y manipulador cartesiano robusto para el sistema AS/RS.

- Implementar un sistema eléctrico y de control que provea precisión, repetibilidad y rapidez.
- Implementar un sistema de registro de objetos almacenados.
- Diseñar e implementar un panel de control para la supervisión e interacción del operario con la máquina durante el proceso de almacenaje y recuperación.
- Realizar pruebas de funcionamiento del AS/RS.

1.6. Hipótesis

¿El diseño e implementación de un prototipo de sistema flexible de almacenamiento/recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial, permitirá la selección de módulos de almacenamiento mediante el reconocimiento dimensional de objetos y la optimización de espacios en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Almacenamiento convencional

Los sistemas de almacenamiento convencional también conocidos como sistemas de paletizado convencional, en la actualidad son muy utilizados en cualquier tipo de industria, puesto que permiten el acceso sistematizado y ordenado a una unidad de carga con un producto específico en las mismas.

El almacenamiento convencional es la solución más adecuada para aquellos lugares en los que es necesario almacenar productos con gran variedad de referencias (Mecalux, s.f.).

Cabe recalcar que un sistema de almacenamiento es un lugar donde un producto permanece en reposo durante un determinado periodo de tiempo.

2.1.1. Características de los sistemas de almacenamiento.

Una de las principales características de los sistemas de almacenamiento convencional es la gran flexibilidad que estos permiten, ya que en los mismos se puede almacenar cualquier tipo de productos, además de ser adaptativo a los cambios, las modificaciones resultan rápidas y relativamente económicas. Usualmente se utiliza un solo método para cargar y descargar. En cuanto al espacio permite adaptarse fácilmente (Gómez, 2013).

2.1.2. Elementos básicos de los sistemas de almacenamiento convencional.

Los elementos básicos de un sistema de almacenamiento convencional se muestran en la figura 1. Existen perfiles y complementos que permiten una óptima adaptación a cada necesidad de carga y de altura (Mecalux, s.f.).

- 1) Bastidores
- 2) Unión del bastidor
- 3) Anclajes

- 4) Placas de nivelación
- 5) Unión pórtico
- 6) Travesaño paleta
- 7) Soporte contenedor
- 8) Estante
- 9) Panel metálico
- 10) Señalización

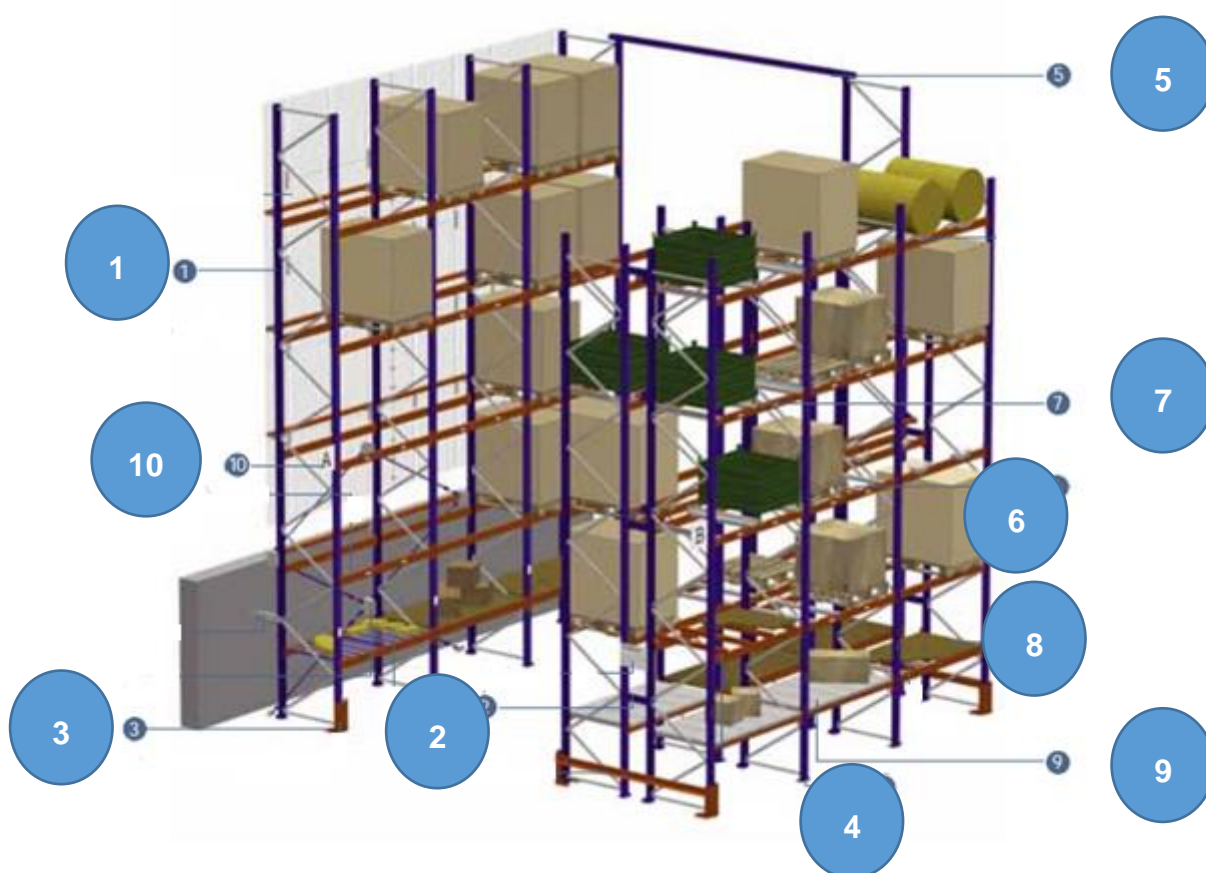


Figura 1. Elementos de un sistema convencional

Fuente: (Mecalux, s.f.)

2.1.3. Funciones de los sistemas de almacenamiento.

Por lo general son tres las funciones básicas de los sistemas de almacenamientos, las cuales son:

- Regular los flujos entre la oferta (fabricación) y la demanda (clientes).

- Optimizar los costes de distribución.
- Requerimientos del proceso productivo

De acuerdo a (Mauleón, 2013) “la función básica del sistema de almacenamiento (regulación del flujo entre la oferta y la demanda) suele presentarse con el símil de un depósito y dos grifos” como se ilustra en la figura 2.

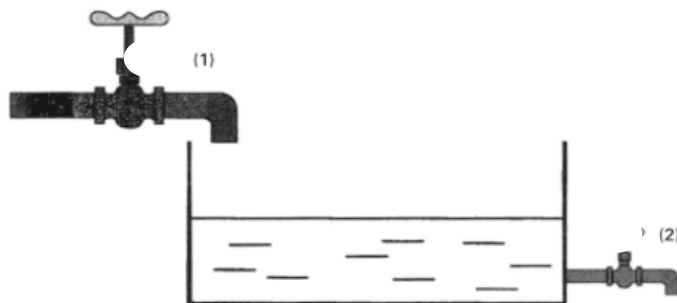


Figura 2. Símil de un sistema de almacenamiento

Fuente: (Mauleón, 2013)

2.1.4. Ventajas de los sistemas de almacenamiento

Dentro de las principales ventajas de los sistemas de almacenamiento se destaca la posibilidad de acceder a un producto específico en cualquier instante. Cabe destacar que en aquellos sistemas de almacenamiento en los que existe un gran número de referencias y pocas unidades por cada referencia, es donde se encuentra la mejor aplicación (Systems, 2017).

- **Ahorro del espacio disponible.**
Mediante los sistemas de almacenamiento se puede aprovechar al máximo el espacio disponible en la superficie de una empresa.
- **Disminución de Costos.**
Debido a flexibilidad de los sistemas de almacenamiento, la implementación es relativamente sencilla, por lo tanto el costo es relativamente bajo. Su fácil adaptabilidad facilita a las empresas que constantemente están sujetas a cambios en función de sus necesidades.
- **Seguridad.**

Los sistemas de almacenamiento ofrecen una amplia seguridad al momento de manejar los diferentes tipos de cargas, puesto que el almacenaje se realiza de una manera organizada.

- **Versatilidad.**

Se diseñan para diferentes tipos de cargas, con diferentes medidas y pesos. Además, se tiene acceso directo a cada referencia, por lo que la recuperación de la carga no necesita desplazar otros pallets (Systems, 2017).

2.1.5. Métodos de almacenaje según el flujo de entrada/salida.

Las características de la carga determina el comportamiento de las entradas y salidas de los inventarios.

- LIFO (*Last In – First Out*): La última carga que entra al almacenamiento es la primera que sale para expedición.
- FIFO (*First In – First Out*): La primera carga en entrar al almacenamiento es la primera en salir.
- FEFO (*First Expired – First Out*): La carga de fecha más próxima a expirar es la primera en salir.
- NIFO (*Next In – First Out*): La próxima carga en entrar será la primera en salir. (Kadier, s.f.)

2.1.6. Soportes para cargas

Los soportes para cargas son elementos en los cuales reposan los objetos durante el proceso de almacenaje y recuperación. Cabe recalcar que dichos soportes están relacionados con el tipo de producto que se va a transportar, así como el almacenaje manipulación y transporte.

- Pallets

Uno de los soportes para transporte de carga más utilizados en la actualidad por las empresas son las paletas o también conocidos como *pallets*; su funcionamiento se basa en el concepto de carga unitaria. De acuerdo con (Iglesias, 2012) “La paleta es una plataforma rectangular horizontal utilizada

como base para apilar, almacenar, manipular, y transportar cargas en general. La altura sobre el suelo de esta plataforma permite su manejo mediante medios mecánicos, que en forma de horquilla se introducen bajo dicha plataforma.”

La norma ISO 445:1965 establece algunas recomendaciones para el diseño de paletas tal como se ilustra en la figura 3. (Almacenamiento de materiales, s.f.)

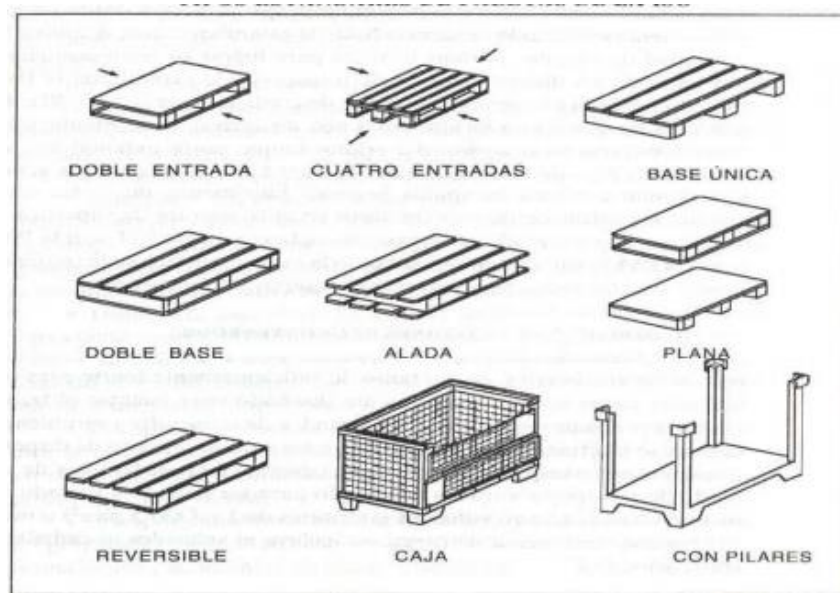


Figura 3. Estándares de paletas según Normas ISO

Fuente: (Almacenamiento de materiales, s.f.)

Las paletas ofrecen varias ventajas, las principales son: uso múltiple, bajo costo, facilidad de manipulación, eficiencia operativa, mejor calidad en el transporte. Además su fabricación se puede realizar ocupando diferentes tipos de materiales, estos pueden ser: madera, plástico o metal. (Almacenamiento de materiales, s.f.)

2.1.7. Tecnologías aplicadas a sistemas de almacenamiento convencional.

Dentro de las tecnologías aplicadas a sistemas de almacenamiento convencionales podemos encontrar varias formas de almacenar y recuperar que facilitan en si el trabajo del operario y es el movimiento y gestión eficaz de materiales en un entorno controlado, las principales que podemos encontrar son los montacargas, sistemas de grúas, apiladoras.

La automatización de sistemas de almacenamiento convencional debe tener como objetivo principal disminuir el tiempo de desplazamiento de cargas así como de personas por el pasillo, aumentar la velocidad de operación, optimizar espacios de almacenamiento, todo esto conlleva a un ahorro significativo de mano de obra y mejora la calidad de producto a entregar. (Romero, 2014)

Actualmente existen diversos sistemas de almacenamiento automatizados, uno de los cuales son los AS/RS, por sus siglas en inglés *Automated storage and Retrieval Systems* (Sistemas automatizados de Almacenamiento y Recuperación).

2.1.8. Sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS)

Básicamente es una estructura que consiste en un sistema de estanterías, que son organizados por pasillos, por donde se traslada un mecanismo automatizado, el cual es capaz de extraer y depositar cargas, conocido también como S/R por sus siglas en inglés *Storage and Retrieval*.

El objeto principal de un AS/RS es reducir al máximo la intervención del humano en el proceso de almacenamiento y recuperación, para lo cual se dispone de estanterías donde se guardan las cargas deseadas y un pasillo por donde se traslada el mecanismo S/R, hasta llegar al espacio de almacenamiento deseado para su carga o descarga.

- **Transacciones de un AS/RS**

En un AS/RS pueden efectuarse tres diferentes tipos de transacciones. Este tipo de transacción se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Transacciones de un AS/RS

TIPO	MOVIMIENTO	TRANSACCION
S	<i>Storage</i> o Almacenamiento	Movimiento que realiza el mecanismo S/R de recoger la carga en el punto de P&D (<i>Pick and Deposit</i> o punto de interacción con el operario), llevarla hasta la estantería correspondiente, situar y dejar la carga y volver al punto de P&D.

CONTINÚA 

R	<i>Retrieval</i> o Recuperación	El mecanismo S/R se mueve hasta el lugar de almacenamiento, estantería donde esta almacenada la carga, la recoge y la lleva al punto de P&D
S/R	Almacenamiento y recuperación	Es una mezcla de las dos anteriores, la máquina recoge la carga en P&D, la almacena en la estantería correspondiente y sin volver al punto de P&D, recoge otra carga de un lugar de almacenamiento diferente y la lleva al punto de pick and deposit (P&D).

Fuente: (Rodriguez, 2010)

- ***Estrategias de almacenamiento***

Por lo general se pueden diferenciar dos estrategias de almacenamiento, las cuales pueden ser: aleatorio o especializado.

- Estrategia de almacenamiento aleatorio

En este tipo de estrategia de almacenamiento cada unidad de carga de un determinado tipo que se almacena, denominado SKU (*Stock keeping unit*), no tiene un lugar asignado previamente. Por lo general para el almacenamiento se utiliza criterios que no impliquen lugares pre-asignados.

- Estrategia de Almacenamiento Especializado

En este tipo de estrategia de almacenamiento los SKU cuentan con un lugar pre-asignado, y suelen ordenarse siguiendo criterios previamente establecidos, de acuerdo a la necesidad de la unidad de carga. (Rodriguez, 2010)

- ***Componentes de un AS/RS***

Normalmente un AS/RS consta de las partes generales (Ver figura 4):

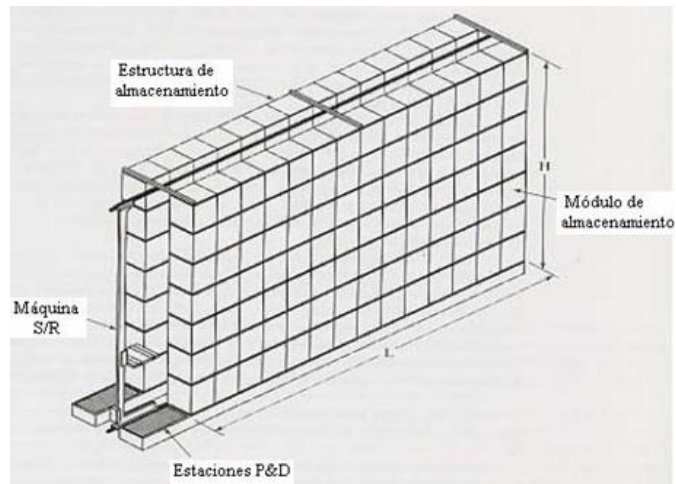


Figura 4. Componentes de un AS/RS

Fuente: (Noriega, 2012)

En la tabla 2 se describe cada uno de los componentes de que son fundamentales en un AS/RS.

Tabla 2

Descripción de los componentes de un AS/RS

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Estructura de almacenamiento	Es el lugar donde se almacena las unidades de carga contenidas en el AS/RS. También se encarga de soportar la máquina S/R
Máquina S/R	La máquina S/R es la encargada de depositar y recoger las unidades de carga en su lugar de almacenamiento hacia la estación P&D.
Módulos de Almacenaje	Son módulos en los cuales se almacena la unidad de carga, por lo general se utilizan pallets.
Estaciones P&D	Son estaciones donde se hace la transferencia de unidades de carga ya sea al interior o exterior del AS/RS.
Sistemas de Control	El sistema de control del AS/RS es el encargado de posicionar la máquina S/R de acuerdo a la necesidad de almacenaje o recuperación, utilizando mandos lógicos programables.

Fuente: (Calsina, 2009)

- ***Tipos de AS/RS***
- *Unit Load AS/RS (AS/RS de Unidad de Carga)*

Este tipo de AS/RS está diseñado para manipular unidades de carga almacenados sobre plataformas o en contenedores estándar como se muestra en la figura 5. Por lo general se manipula por medio de un computador. (Martinez, 2012)

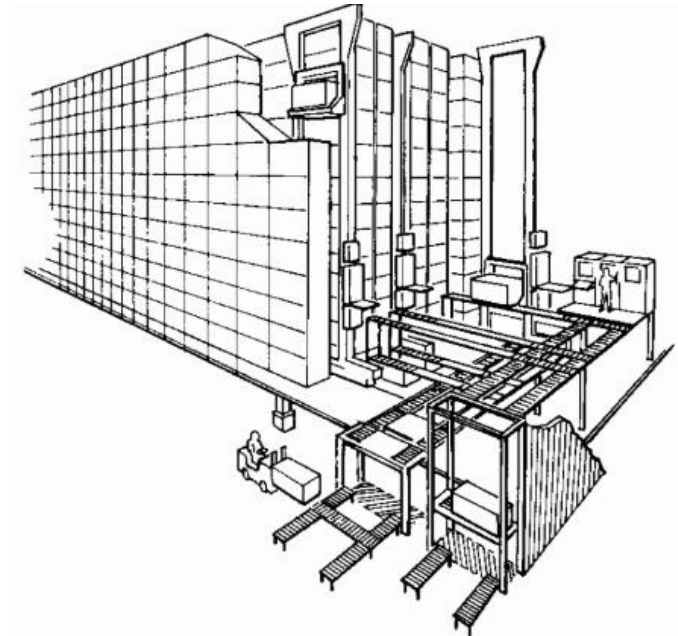


Figura 5. AS/RS De unidad de carga

Fuente: (Vélez, 2017)

- *Deep-Lane AS/RS*

Este tipo de AS/RS es comúnmente utilizado cuando se almacenan grandes cantidades en stock, pero el número de SKUs diferentes es relativamente pequeño (ver figura 6). Para la entrada y salida de unidades de carga se utiliza diferentes lugares pero el mismo mecanismo S/R. (Martinez, 2012)

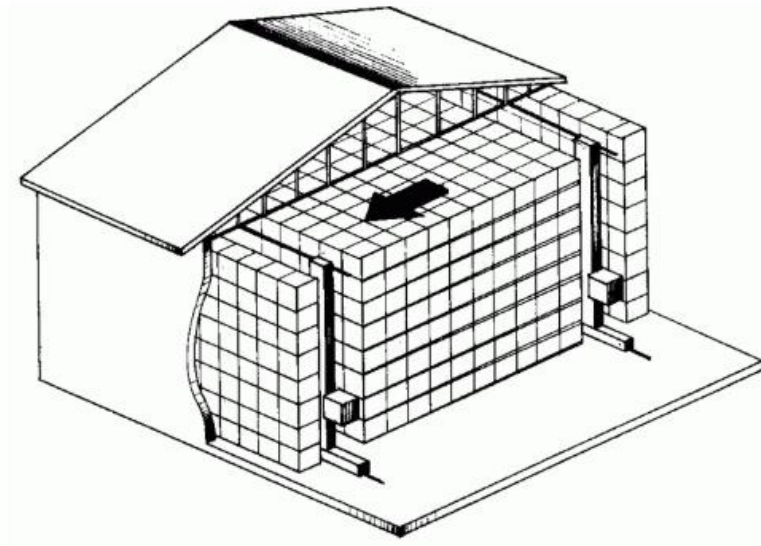


Figura 6. Deep-Lane AS/RS

Fuente: (Vélez, 2017)

- *Man-On-Board* AS/RS (AS/RS de Hombre a Bordo)

Este tipo de AS/RS permite recoger las unidades de carga directamente de sus posiciones de almacenamiento, por un operador que va sobre el mecanismo S/R (Ver figura 7). (Martinez, 2012)

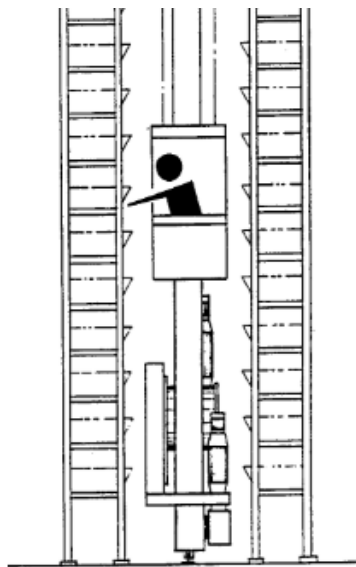


Figura 7. AS/RS de Hombre a Bordo

Fuente: (Vélez, 2017)

- *Miniload AS/RS (AS/RS de Mini carga)*

Este tipo de AS/RS es utilizado cuando se considera que la carga a transportar es relativamente pequeña, el mecanismo S/R es diseñado para almacenar y recuperar en una estación P&D, dicha estación por lo general es manejada por un operario (ver figura 8). (Martinez, 2012)

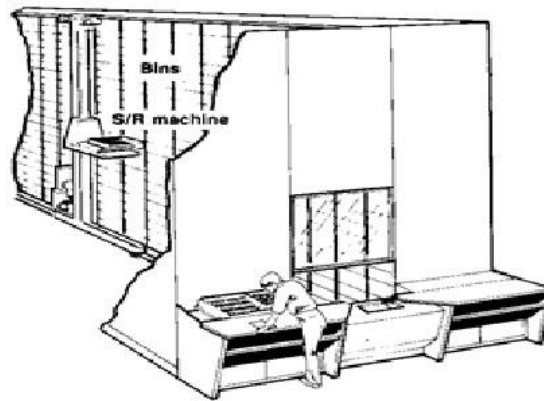


Figura 8. AS/RS de mini carga

Fuente: (Noriega, 2012)

Existen varios aspectos que caracterizan este tipo de AS/RS, los más importantes son:

- Capacidad de carga útil, por lo general cargas relativamente pequeñas.
- Módulos de almacenaje para carga única o múltiple.
- Velocidad de operación alta
- Máquina S/R estándar en la mayoría de aplicaciones.
- Flexible a diversos sistemas de control.
- **AS/RS en el mercado.**

Actualmente existen varias empresas alrededor del mundo que fabrican y distribuyen, Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación AS/RS. A continuación, se detallan características de tres empresas proveedoras de AS/RS.

WESTFALIA

Westfalia es una empresa americana dedicada a fabricar sistemas de almacenamiento. Están enfocados principalmente en garantizar la capacidad de

adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado actualmente y en el futuro. (Westfalia, 2018)

Se especializan en las siguientes configuraciones:

- Sistemas de almacenamiento de alta densidad y múltiple profundidad.
- Sistemas de almacenamiento de doble profundidad
- Sistemas de almacenamiento de profundidad simple

Uno de los principales sistemas de almacenamiento de dicha empresa son los de alta densidad como se muestra en la figura 9, ya que incrementa la eficiencia del almacén al:

- Maximizar el espacio de almacenamiento disponible en las estructuras existentes, evitando el almacenamiento y las expansiones fuera de las instalaciones
- Minimizar la superficie de construcción general un 50% en comparación con los almacenes convencionales
- Reducir los costos de energía un 40% en los entornos de enfriamiento
- Reducir los costos de mano de obra y daños al producto
- Incrementar la precisión del inventario y el servicio al cliente. (Westfalia, 2018)



Figura 9. Sistema de Almacenamiento AS/RS de alta densidad Westfalia

Fuente: (Westfalia, 2018)

G.I.EICOM Sistematización de Flujo de Materiales

G.I.EICOM es una empresa mexicana dedicada a la sistematización y automatización del flujo de productos. Ofrecen diferentes productos de ingeniería dentro de los cuales se encuentran los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación AS/RS. Principalmente AS/RS de tipo transelevador o *miniload* como se muestra en la figura 10. (GIEICOM, 2017)

Las principales características de este modelo de AS/RS son:

- Constituido por grúas o robots de precisión.
- Capacidad de recorrer grandes distancias rápidamente.
- Contiene software necesario para gestionar en tiempo real el almacén.



Figura 10. AS/RS de tipo transelevador G.I.EICOM

Fuente: (GIEICOM, 2017)

SYSTEM Logistics

System Logistics es una empresa italiana que fabrica sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación AS/RS, pensados para minimizar el espacio utilizado en los almacenes y obtener un más alto nivel de eficiencia y productividad (Ver figura 11). (SYSTEM Logistics, 2018)

Están diseñados para almacenar diferentes unidades de carga como:

- Paletas
- Contenedores
- Cajas

Estos sistemas pueden estar formados por:

- Transelevadores
- Mini-carga
- FRS (*Fast Rotation Storage*)
- VLS (*Vertical Lift Sequencer*) (SYSTEM Logistics, 2018)

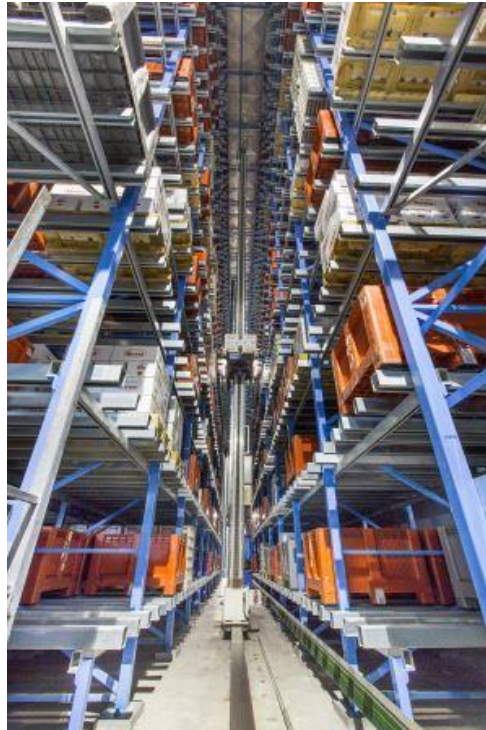


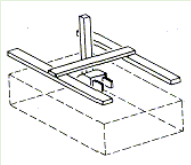
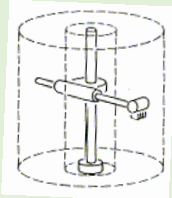
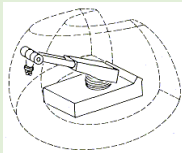
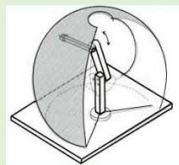
Figura 11. Modelo AS/RS System Logistics

Fuente: (SYSTEM Logistics, 2018)

2.1. Características morfológicas de robots

Para la selección del tipo de configuración de la estructura mecánica que va a tener el robot manipulador, es necesario realizar una comparación de las características de los mismos como se muestra en la tabla 3, que a su vez servirá para conocer y definir tanto la orientación como la posición del elemento terminal.

Tabla 3
Características Morfológicas de Robots

Característica	Cartesiano	Cilíndrico	Polar o Esférico	Angular o Antropomórfico
Volumen de trabajo (Gráfico)				
Volumen de trabajo (Matemático)	L^3	$9L^3$	$29L^3$	$33L^3$
Capacidad de Carga	Independiente de la configuración	Independiente de la configuración	Dependiente de la configuración	Dependiente de la configuración
Precisión y Resolución	Constantes en el volumen de trabajo	Variables en el volumen de trabajo	Variables en el volumen de trabajo	Variables en el volumen de trabajo.
Aplicaciones	Paletizado	Carga y Descarga	Soldadura, montaje, carga y descarga	Todas las anteriores
Geometría para el sistema de control	Sencilla	Compleja	Compleja	Compleja

Fuente: (Romeo)

2.2. Mecanismos de transmisión de movimiento

- **Transmisión de movimientos por bandas**

Por lo general es uno de los sistemas de transmisión más utilizados en la construcción de máquinas, está compuesto por un juego de poleas y un cierto número de bandas o correas que se determinan al momento del diseño del sistema.

Existen varias ventajas y desventajas al momento de utilizar este tipo de transmisión de movimiento, las mismas se muestran en la tabla 4:

Tabla 4

Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por bandas.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Muy fiable y no falla a menos que se someta a cargas superiores a las de diseño.	A tensiones muy altas la banda puede romperse o salirse de la polea.
Bajo ruido en el funcionamiento	Grandes esfuerzos en los cojinetes al momento de la puesta en marcha.
Capacidad de absorber choques y vibraciones.	Se produce el fenómeno de resbalamiento
No necesita lubricación.	Adicionalmente necesita elementos especiales de tensión.
El sistema es económico comparado con otros sistemas de transmisión	La longitud de la correa puede variar de acuerdo a la humedad y temperatura.
Tienen cierta elasticidad.	Debido al fenómeno de resbalamiento, no es recomendable para trabajos de alta precisión y exactitud.

Fuente: (Ruiz, Elementos de Máquinas, s.f.)

- **Transmisión de movimiento por cadena**

Se emplean para transmitir movimientos entre dos ejes que se encuentran separados entre sí, constituyen uno de los métodos más eficientes para transmitir potencia mecánica, al igual existen varias ventajas así como desventajas al momento de utilizar este tipo de transmisión de movimiento que se muestran en la tabla 5:

Tabla 5

Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por cadenas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Transmite potencia a grandes distancias.	Elevado costo tanto de implementación como de mantenimiento.
Puede tener longitudes variables, mediante la adición o eliminación de	Se requiere montajes precisos con el fin de evitar que alguna de las

CONTINÚA 

eslabones.	caras se someta a cargas superiores y falle por fatiga tempranamente.
Rendimientos elevados del orden del 98% debido a la eliminación del deslizamiento entre componentes del sistema.	Mantenimiento minucioso.
No existe tensión previa	Necesita Lubricación.
Se puede transmitir a varios ejes con una misma cadena.	Se pueden presentar marchas irregulares.
Para transmitir potencias elevadas basta con emplear múltiples hileras.	

Fuente: (Ruiz, Elementos de Máquinas, s.f.)

- **Transmisión de movimiento Husillo de potencia.**

Este mecanismo transforma el movimiento circular a uno lineal, está compuesto por una tuerca acoplada a un husillo roscado. Al girar el husillo y permaneciendo fija la tuerca, hace que la tuerca se desplace en forma lineal al eje roscado, son muy utilizados para transmitir fuerza y potencia al igual que los anteriores sistemas existen varias ventajas así como desventajas al momento de utilizar este tipo de transmisión de movimiento que se muestran en la tabla 6:

Tabla 6

Ventajas y Desventajas de los sistemas de transmisión por husillos de potencia.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Utilizados para transmitir altas potencias.	Elevado rozamiento entre husillo-tuerca.
Facilidad para realizar el diseño.	Poca eficiencia en la transmisión.
Fabricación de componentes con gran exactitud.	Desgaste y calentamiento deben considerarse para su diseño.
Movimiento irreversible, de circular a lineal.	Necesita lubricación
Relativamente económico debido a los elementos que se componen.	No es recomendable para transmitir movimiento a largas distancias.
Alta precisión y exactitud.	
Evita el efecto deslizamiento, a no ser que se ocupen husillos de bolas.	

Fuente: (Mérida, 2010)

2.4. Visión Artificial (VA)

2.4.1. Definición

Uno de los sentidos más importantes de los seres humanos es la visión, ya que este nos permite obtener una amplia información del medio que nos rodea, pudiendo así procesar y establecer acciones adecuadas.

Mediante el avance de la tecnología, se han desarrollado sistemas de visión por computador o también conocidos como visión artificial, el cual se originó con la implementación de la inteligencia artificial que consiste en programar una computadora para que tenga la capacidad de captar y entender la información proveniente de cierto medio.

(Cabeza, s.f.) Define a la visión artificial como: “El procedimiento de adquisición de imágenes, sin contacto y mediante sistemas ópticos, donde se realiza el análisis automático de las mismas, además es el método para extraer la información necesaria para controlar un proceso o actividad.”

2.4.2. Dispositivo utilizado para VA

Dependiendo de la aplicación, en el mercado se puede encontrar diversos tipos de cámaras para adquirir imágenes, dentro de las cuales las más utilizadas son las cámaras web, debido a su facilidad de manejo, bajo costo, facilidad de acoplamiento y comunicación que se maneja por conexión USB o RS-232.

2.4.2.1. Cámara web

Una cámara web es un dispositivo digital que permite capturar imágenes mediante un computador, un ejemplo de cámara web se puede visualizar en la figura 12, aunque actualmente además transmiten sonido. Existen varios parámetros que definen una cámara web, uno de los cuales es la resolución por lo general tienden a tener entre 1.0 y 1.3 megapíxeles de resolución.



Figura 12. Cámara Web Logitech

Fuente: (Logitech, 2018)

Cabe recalcar que la resolución de la imagen es equivalente a la resolución del sensor, y la referencia del sistema de coordenadas se encuentra ubicado en la parte superior izquierda como se muestra en la figura 13. De acuerdo al sistema de referencia las variables vienen dadas por altura (y) y anchura (x).

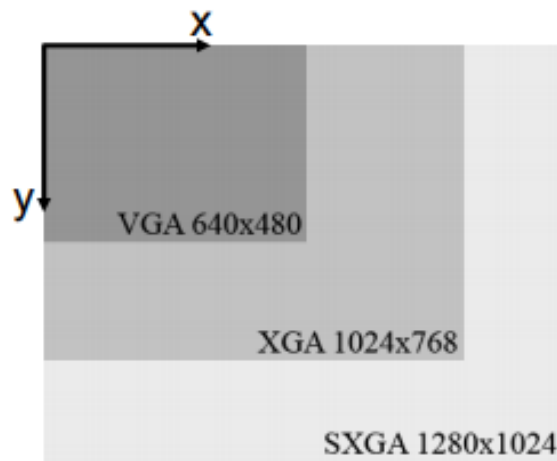


Figura 13. Sistema de Referencia de acuerdo a la resolución.

Fuente: (Druzella, SICK (Sensor Intelligence), s.f.)

Otro parámetro a tomar en cuenta son los cuadros por segundo que la cámara web puede capturar, también conocidos como FPS (Frame Per Second), los FPS es un valor con el cual el ojo humano ve una secuencia de imágenes de manera fluida.

El funcionamiento de una cámara Web parte de los rayos de luz procedentes de los objetos que en movimiento traspasan el lente como se observa en la figura 14, luego se reflejan en un filtro RGB, el cual descompone la luz en tres colores básicos: rojo, verde y azul. Esta división de rayos se concentra en un chip sensible a la luz conocido también como sensor de imagen que pueden ser CCD (*charge coupled*

device) o CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*), el cual asigna valores binarios a cada píxel y envía los datos digitales para su posterior procesamiento. (Informática Moderna, s.f.)

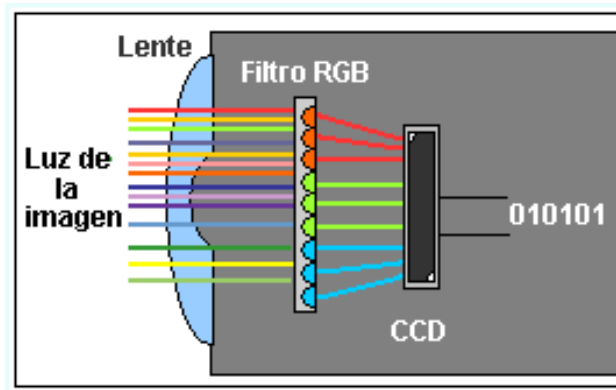


Figura 14. Funcionamiento Cámara Web

Fuente: (Informática Moderna, s.f.)

2.4.3. Procesamiento digital de imágenes (PDI)

El objetivo principal del procesamiento digital de imágenes PDI, es aplicar ciertas técnicas que permitan mejorar la calidad de la imagen o a su vez bien facilitar el reconocimiento de patrones y características presentes en ellas. (Querejeta, 2015)

Matemáticamente una imagen puede ser representada como una función bidimensional $f(x,y)$ donde x , y representan coordenadas espaciales en un plano, y f representa la intensidad o nivel de gris de la imagen en dicha coordenada.

2.4.3.1. Niveles de Procesamiento

- Procesos de bajo nivel

En este tipo de procesos se utilizan operaciones como el preprocesamiento para reducir el ruido en la imagen, mejorar el contraste y utilización de filtros de enfoque; su característica principal es que tanto las entradas como las salidas son imágenes. (Mejía Vilet , 2005)

- Procesos de nivel medio

En este nivel se utiliza operaciones como segmentación y clasificación de objetos individuales. Una de las características principales es que por lo general las entradas

son imágenes y las salidas son singularidades extraídas de dichas imágenes como por ejemplo contornos, bordes. (Mejía Vilet , 2005)

- Procesos de alto nivel

Este nivel implica el obtener algún significado de un conjunto de objetos reconocidos y, finalmente, realizar las funciones cognitivas asociadas con la vista. (Mejía Vilet , 2005)

2.4.4. Etapas del procesamiento de imágenes

Existen varias etapas para el procesamiento de imágenes, las cuales se detallan en la tabla 7:

Tabla 7

Etapas del Procesamiento de Imágenes

Etapas del Procesamiento de Imágenes	
Captura	Desarrollo de las propiedades de la captura, por ejemplo el tipo de sensor, distancia, número de píxeles.
Pre-Procesamiento	Establecer el entorno que no es parte del problema, por ejemplo el fondo de la imagen, ruido, etc.
Segmentación	Reconocer y extraer objetos presentes en la imagen
Extracción de Características	Extraer características relevantes para la identificación de los objetos deseados.
Identificación de Objetos	Utilizar un método de toma de decisiones para categorizar al objeto.

Fuente: (Wainschenker, 2011)

CAPÍTULO III

Diseño y Selección de Componentes

3.1. Diseño del sistema mecánico

Para el diseño mecánico se tomarán en cuenta varias consideraciones, dentro de las cuales se tiene: diseño de almacenadores, elección del tipo de configuración de la estructura mecánica del robot y diseño de la misma, tipo de transmisión de movimientos, diseño de la estructura de la base y selección de componentes. Dichos aspectos se tratarán a continuación.

3.1.1. Diseño de almacenadores

Para diseñar la configuración de almacenadores se tiene como límite máximo dimensional 150x150x150 [mm], que es el tamaño máximo estándar de una mesa de impresión 3D, a partir de esto se considera la distribución (ver figura 15):

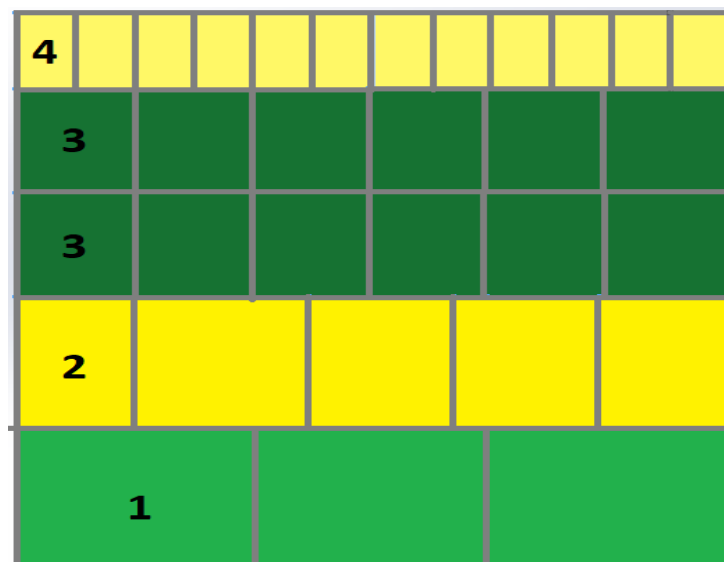


Figura 15. Distribución de Almacenadores

Como se mira en la figura 15 se tendrá: tres espacios para objetos de 150x150x150 [mm], cinco almacenadores para productos de 120x120x150 [mm], doce lugares para piezas de 100x100x150 [mm] y doce espacios para objetos de 50x80x150 [mm], haciendo un total de 32 espacios de almacenamiento por estante.

Para el presente proyecto se propone construir dos estructuras de almacenadores para tener un total de 64 espacios de almacenamiento, pues de esta manera la capacidad de almacenaje del AS/RS se duplicará sin incrementar considerablemente los costos de fabricación.

3.1.2. Selección del tipo de configuración morfológica del Robot

En base a la tabla 3 descrita en el anterior capítulo, el tipo de configuración que se utilizará en la construcción del robot será la de tipo cartesiano, puesto que la estructura plantea el diseño de un estante dividido en almacenadores con diferentes dimensiones, este tipo de estructura requiere de un volumen de trabajo cubico, la capacidad de carga es independiente de la configuración, usualmente el robot cartesiano es utilizado para tareas de paletizado, tiene una geometría sencilla, es decir cumple con las características apropiadas para el transporte de carga y la implementación del sistema de control del AS/RS propuesto.

De igual forma la configuración cartesiana facilita la implantación de un efector final bidireccional que permitirá añadir un segundo módulo de almacenadores sin mayores problemas estructurales o de presupuesto.

3.1.3. Selección del tipo de transmisión de movimiento

Como se definió en la sección del tipo de configuración morfológica del robot será de tipo cartesiano, es decir, tiene que desplazarse en un plano cartesiano de tres ejes de forma lineal, por lo tanto, es necesario transformar el movimiento del elemento motriz que para el caso son motores, en movimientos lineales.

Tomando en cuenta las necesidades del sistema AS/RS para el Laboratorio de Mecatrónica se implementará la transmisión por husillo de potencia, pues el presente proyecto requiere de precisión, exactitud y simplicidad en el montaje del sistema de transmisión. Como la masa a transportar y la masa propia de la estructura del sistema de movimiento será considerable, se opta por usar husillos de

bolas para optimizar la eficiencia de transmisión al disminuir el rozamiento con relación al resto de tornillos de potencia.

3.1.4. Selección de componentes para el sistema de transmisión

Una vez diseñada la estructura de almacenadores se tiene como datos la masa máxima que transportará el manipulador cartesiano con una pieza de 150x150x150 mm, la masa del pallet de mayor tamaño, la maza del eje Z (como el espacio que albergará el sistema de transmisión del eje Z es reducido, con una carrera corta se ha establecido un eje de potencia CNC de 8mm y guías lineales planas, restando únicamente el dimensionamiento del motor que impulsará este eje) y las carreras de desplazamiento de cada eje de acuerdo con la estructura ya diseñada se tienen los siguientes valores.

Datos

$$m_{ObjetoMax} = 3.45 \text{ Kg}$$

$$m_{PalletMax} = 0.204 \text{ Kg}$$

$$m_{EjeZ} = 6.5 \text{ Kg}$$

$$Carrera_x = 960 \text{ mm}$$

$$Carrera_y = 760 \text{ mm}$$

Con los datos mostrados, las dimensiones de los carros que se desplazan en los ejes X-Y, y agregando 100 mm extra para acople y sujeción se determinan las dimensiones de los husillos que transmitirán movimiento.

$$husillo_x = 1200 \text{ mm}$$

$$husillo_y = 1000 \text{ mm}$$

Una vez determinada la longitud de cada eje se puede iniciar la selección basados en el Catálogo General THK de Husillos de bolas. Siguiendo el manual se procede a seleccionar la precisión del paso del husillo mediante la tabla 8.

Tabla 8*Husillos de bolas de precisión.*

Husillo de bolas de precisión													
		Husillo de bolas laminado											
Niveles de precisión		C0	C1	C2	C3	C5	C7	C8	C10				
Longitud de rosca efectiva	Por encima O menos	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación	Error de distancia de recorrido representativa	Fluctuación
		800	1000	8	6	11	8	15	10	21	15	40	27
1000	1250	9	6	13	9	18	11	24	16	46	30	50/300mm	+- 100/300mm
1250	1600	11	7	15	10	21	13	29	18	54	35		+- 210/300mm
1600	2000	-	-	18	11	25	15	35	21	65	40		

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

Analizando la precisión que requiere la aplicación, la disponibilidad en el mercado y economía se elige husillos de bolas del tipo laminado C8.

Al tener la dimensión requerida de los husillos se procede a elegir el diámetro de acuerdo con la tabla 9. Observando la tabla se podría usar para el eje X, que es el de mayor longitud un diámetro de 14-18 [mm], por disponibilidad en el mercado nacional se selecciona un diámetro de 16 mm que seguramente brindará un factor de seguridad mayor. Por facilidad de montaje y funcionamiento general del sistema de movimiento se decide usar el mismo diámetro de 16 mm para el eje Y.

Tabla 9*Diámetros de husillos*

Diámetro exterior del husillo	Longitud total del husillo		
	C7	C8	C10
10 a 12	500	1000	--
14 a 15	1500	1500	1500
16 a 18	1500	1800	1800
20	2000	2200	2200

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

Mediante la tabla 10, se define un paso de [5mm] estándar para husillos de bolas laminados de 16 [mm] de diámetro.

Tabla 10

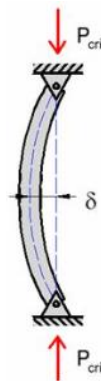
Paso de rosca de acuerdo al diámetro del eje de husillo

Diámetro exterior del eje de husillo	Paso																			
	1	2	4	5	6	8	10	12	16	20	24	25	30	32	36	40	50	60	80	100
15							●		●			●								
16				●					●											
18						●														

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

- **Cálculo carga axial admisible**

Para el cálculo de carga axial admisible es necesario elegir el método de montaje, por la longitud de los husillos y evitar posibles vibraciones que afecten al sistema se elige un montaje fijo-fijo como se muestra en la figura 16. El catálogo provee el procedimiento a seguir para determinar la carga axial admisible de deformación de los ejes X, Y mediante la ecuación 1.

**Figura 16.** Montaje Fijo-fijo

$$P_1 = \frac{\eta_1 * \pi^2 * E * I}{(\ell_a)^2} * 0.5$$

Ec. 1

Donde:

$P_1 \rightarrow$ Carga de deformación [N]

$\ell_a \rightarrow$ Distancia entre dos superficies de montaje [mm]

$E \rightarrow$ Módulo de Young ($2.06 * 10^5$ [N/mm²])

$I \rightarrow$ Momento geométrico mínimo de inercia del eje [mm⁴]

$\eta_1 - \eta_2 \rightarrow$ Factor de acuerdo con el método de montaje (Ver tabla 11)

0.5 \rightarrow Factor de seguridad sugerido en el catálogo

Tabla 11

Factores de métodos de montaje

Fijo – libre	$\eta_1 = 0.25$	$\eta_2 = 1.3$
Fijo - con soporte	$\eta_1 = 2$	$\eta_2 = 10$
Fijo – fijo	$\eta_1 = 4$	$\eta_2 = 20$

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

Cálculo del momento mínimo de inercia:

$$I = \frac{\pi}{64} * d_1^4$$

Ec. 2

Donde:

$d_1 \rightarrow$ Diámetro menor de rosca del eje de husillo (mm) en base a la tabla 12.

Tabla 12
Diámetros de rosca

Diámetro exterior del eje del husillo D	Paso Ph	Descripción del modelo	Diámetro de bola centro a centro dp	Diámetro menor de rosca Dc	Cantidad de circuitos cargados Hileras x vueltas	Capacidad de carga básica		
						Ca kN	Coa kN	Diámetro exterior D
14	4	JPF 1404-4	14,4	11,5	2 x 1	2,8	5,1	26
	5	JPF 1405-4	14,5	11,2	2 x 1	3,9	8,6	26
16	5	JPF 1605-4	16,75	13,5	2 x 1	3,7	8,2	30
20	5	JPF 2005-6	20,5	17,2	3 x 1	6	16	34

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

$$I = \frac{\pi}{64} * 13.5^4 [mm^4]$$

$$I = 1630.44 [mm^4]$$

Cálculo de la carga axial admisible para el eje X:

$$P_1 = \frac{4 * \pi^2 * 2.06 * 10^5 [N/mm^2] * 1630.44 [mm^4]}{(1140 [mm])^2} * 0.5$$

$$P_1 = 5101.43 [N]$$

$$P_1 = 5.10 [kN]$$

Cálculo de la carga axial admisible para el eje Y:

$$P_1 = \frac{4 * \pi^2 * 2.06 * 10^5 [N/mm^2] * 1630.44 [mm^4]}{(920 [mm])^2} * 0.5$$

$$P_1 = 7832.96 [N]$$

$$P_1 = 7.83 \text{ [kN]}$$

- **Cálculo de la carga de compresión de tracción admisible**

Cuando se aplica una carga axial en un husillo de bolas no solo se debe tener en cuenta la carga de deformación, sino también la carga de compresión de tracción admisible en relación con el esfuerzo de deformación sobre el eje de husillo, dicha carga se calculan con la ecuación 3.

$$P_2 = \sigma * \frac{\pi}{4} * d_1^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$P_2 \rightarrow$ Carga de compresión de tracción admisible [N]

$\sigma \rightarrow$ Esfuerzo de compresión de tracción admisible (147 [MPa])

$d_1 \rightarrow$ Diámetro menor de rosca del eje de husillos [mm]

Se calcula la carga axial admisible para el eje X y Y:

$$P_2 = 147 \text{ [MPa]} * \frac{\pi}{4} * (13.5 \text{ [mm]})^2$$

$$P_2 = 21041.41 \text{ [N]}$$

$$P_2 = 21.04 \text{ [kN]}$$

- **Cálculo de velocidades de rotación admisibles:**

El siguiente paso será calcular las velocidades de rotación admisibles en cada eje mediante la ecuación 4, pues el husillo podría entrar en resonancia y fallar debido a la frecuencia natural.

$$N_1 = \frac{60 * \lambda_1^2}{2 * \pi * (\ell_b)^2} * \sqrt{\frac{E * 10^3 * I}{\gamma * A}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$N_1 \rightarrow$

Velocidad de rotación admisible determinada por la velocidad pelgrosa [min^{-1}]

$\ell_b \rightarrow$ Distancia entre dos superficies de montaje [mm]

$E \rightarrow$ Módulo de Young ($2.06 * 10^5$ [N/mm²])

$I \rightarrow$ Momento geométrico mínimo de inercia del eje [mm⁴]

$\gamma \rightarrow$ Densidad (gravedad específica $7.85 * 10^{-6}$ [$\frac{kg}{mm^3}$])

$A \rightarrow$ Área transversal del eje de husillo [mm²]

$\lambda_1 \rightarrow$ Factor de acuerdo con el método de montaje (Ver Tabla 13)

Tabla 13

Factores de acuerdo con el método de montaje

Fijo – libre	$\lambda_1 = 1.875$	$\lambda_2 = 3.4$
Con soporte – Con soporte	$\lambda_1 = 3.142$	$\lambda_2 = 9.7$
Fijo – con soporte	$\lambda_1 = 3.927$	$\lambda_2 = 15.1$
Fijo – fijo	$\lambda_1 = 4.73$	$\lambda_2 = 21.9$

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

Cálculo del área de la sección transversal de los dos husillos mediante la ecuación 5.

$$A = \frac{\pi}{4} * d_1^2 \quad \text{Ec. 5}$$

$$A = \frac{\pi}{4} * (13.5 \text{ [mm]})^2$$

$$A = 143.13 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La velocidad de rotación admisible para el eje X será:

$$N_1 = \frac{60 * 4.73^2}{2 * \pi * (1140 \text{ [mm]})^2} * \sqrt{\frac{2.06 * 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]} * 10^3 * 1630.44 \text{ [mm}^4\text{]}}{7.85 * 10^{-6} \text{ [kg/mm}^3\text{]} * 143.13 \text{ [mm}^2\text{]}}}$$

$$N_1 = 2842.30 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$N_1 = 2842.30 \text{ [RPM]}$$

La velocidad de rotación admisible para el eje Y será:

$$N_1 = \frac{60 * 4.73^2}{2 * \pi * (920 [mm])^2} * \sqrt{\frac{2.06 * 10^5 [N/mm^2] * 10^3 * 1630.44 [mm^4]}{7.85 * 10^{-6} [kg/mm^3] * 143.13 [mm^2]}}$$

$$N_1 = 4364.19 [min^{-1}]$$

$$N_1 = 4364.19 [RPM]$$

Una vez calculadas las cargas axiales y de compresión admisibles, las velocidades admisibles para cada eje se calcularán las cargas axiales críticas que soportará cada eje en la práctica.

El catálogo proporciona las ecuaciones 6 y 7 para el cálculo de la carga axial en montaje horizontal y vertical respectivamente, se tomarán en cuenta únicamente las ecuaciones donde la carga será mayor.

- **Cálculo de la carga axial en montaje horizontal (eje X): (ver figura 17)**

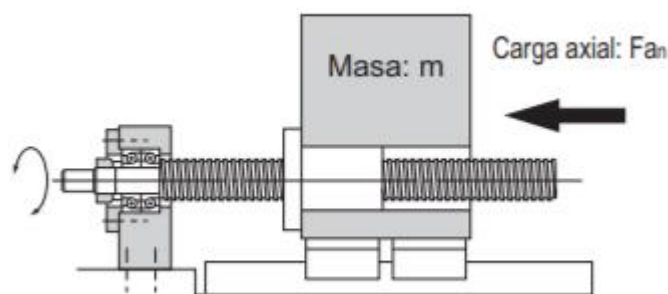


Figura 17. Diagrama de carga axial en montaje horizontal.

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

$$Fa_1 = \mu * mg + f + ma$$

Ec. 6

Donde:

$Fa_1 \rightarrow$ Carga axial durante la aceleración hacia delante [N]

$\mu \rightarrow$ Coeficiente de fricción de la superficie de la guía

$m \rightarrow$ Masa transferida [kg]

$g \rightarrow$ Aceleración gravitacional [m/s^2]

$f \rightarrow$ Resistencia de la superficie de la guía (sin carga)[N]

$a \rightarrow$ Aceleración [m/s^2]

En primer lugar, se calcula la velocidad lineal admisible que tendrá el eje X:

$$v_X = N_1 * Ph$$

Ec. 7

Donde:

$Ph \rightarrow$ Paso del husillo de bolas [mm]

$N_1 \rightarrow$ [RPM]

$$v_X = 2842.30[RPM] * 5[mm]$$

$$v_X = 14211.5 [mm/min]$$

$$v_X = 14.21 [m/min]$$

$$v_X = 0.24 [m/s]$$

$$a = \frac{v_{max}}{t_1}$$

Ec. 8

Donde:

$v_{max} \rightarrow$ Velocidad máxima [m/s]

$t_1 \rightarrow$ Tiempo de aceleración [s]

Se tomará en cuenta para el cálculo de la aceleración la velocidad admisible como caso crítico, de esta forma aseguramos que el eje no fallará. De igual manera se tomará un tiempo de aceleración de 3 [s] como caso crítico.

$$a = \frac{0.24[m/s]}{3[s]}$$

$$a = 0.08 [m/s^2]$$

Finalmente para calcular la carga axial aplicada se recurre al catálogo Bosch Rexroth AG de rodamientos lineales para saber el coeficiente de fricción del kit de rodamiento y guía lineal ($\mu = 0.001 - 0.004$), de igual manera a la tabla 14, para saber la fuerza de resistencia de la superficie de la guía lineal sin carga (fuerza de fricción), sabiendo que se ha elegido un juego de guías lineales y rodamientos circulares estándar de diámetro 12 [mm] para el eje X.

Tabla 14*Fuerza de resistencia de la superficie de la guía lineal*

Eje ϕ d (mm)	Cerrados y ajustables Fuerza de arranque (N) ca.	Fuerza de fricción (N) ca.	Abiertos Fuerza de arranque (N) ca.	Fuerza de fricción (N) ca.
10	2	1	-	-
12	6	2	8	3
16	9	3	12	4

$$m = m_{ObjetoMax} + m_{PalletMax} + m_{EjeZ}$$

$$m = 3.45 [Kg] + 0.204 [kg] + 6.5 [Kg]$$

$$m = 10.15 [kg]$$

$$Fa_1 = 0.004 * 10.15 [kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s} \right] + 2[N] + 10.15 [kg] * 0.0126 [m/s^2]$$

$$Fa_1 = 3.19 [N]$$

- Cálculo de la carga axial en montaje horizontal (eje Y) (ver figura 18):

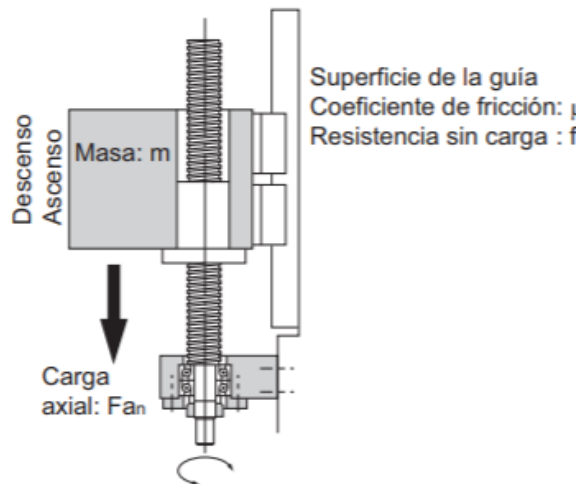


Figura 18. Diagrama de carga axial en montaje horizontal

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

$$Fa_1 = mg + f + ma$$

Ec. 9

Donde:

$Fa_1 \rightarrow$ Carga axial durante la aceleración hacia delante [N]

$m \rightarrow$ Masa transferida [kg]

$g \rightarrow$ Aceleración gravitacional [m/s^2]

$f \rightarrow$ Resistencia de la superficie de la guía (sin carga)[N]

$a \rightarrow$ Aceleración [m/s^2]

En primer lugar, calculamos la velocidad lineal admisible que tendrá el eje Y, mediante la ecuación 7:

$$v_Y = 4364.19 [RPM] * 5[mm]$$

$$v_Y = 21820.95 [mm/min]$$

$$v_Y = 3.47 [m/min]$$

$$v_Y = 0.36 [m/s]$$

$$a = \frac{v_{max}}{t_1}$$

Donde:

$v_{max} \rightarrow$ Velocidad máxima [m/s]

$t_1 \rightarrow$ Tiempo de aceleración [s]

Se tomará en cuenta para el cálculo de la aceleración la velocidad admisible como caso crítico, de esta forma aseguramos que el eje no fallará. De igual manera se tomará un tiempo de aceleración de 3 [s] como caso crítico.

$$a = \frac{0.036[m/s]}{3[s]}$$

$$a = 0.121 [m/s^2]$$

Para calcular la carga axial aplicada se debe tomar la tabla 14 para saber la fuerza de resistencia de la superficie de la guía lineal sin carga (fuerza de fricción), sabiendo que se ha elegido un juego de guías lineales y rodamientos circulares estándar de diámetro 16 [mm] para el eje Y.

$$m = m_{ObjetoMax} + m_{PalletMax} + m_{EjeZ} + m_{EjeX}$$

Se calcula mediante software la masa del eje X con kit de guías de 12 [mm] y husillo de 16 [mm].

$$m = 3.45 [Kg] + 0.204 [kg] + 6.5 [Kg] + 11.16 [kg]$$

$$m = 21.32 [kg]$$

$$Fa_1 = 21.32 [kg] * 9.8 \left[\frac{m^2}{s} \right] + 3[N] + 21.32 [kg] * 0.0193 [m/s^2]$$

$$Fa_1 = 214.52 [N]$$

- **Cálculo del factor de seguridad estático:**

Ya calculada la carga axial admisible y la carga axial crítica que soportarán los ejes en la aplicación, es momento de saber el factor de seguridad estático que se tendrá en los ejes X y Y para lo cual se utiliza la ecuación 10.

$$\frac{F_p}{F_a} > 1 \quad \text{Ec. 10}$$

$F_p \rightarrow$ Carga axial admisible (P_1)[N]

$F_a \rightarrow$ Carga axial aplicada[N]

Para el eje X:

$$\frac{F_p}{F_a} = \frac{5100[N]}{3.19 [N]} = 1598.74$$

Para el eje Y:

$$\frac{F_p}{F_a} = \frac{7832.96[N]}{214.52 [N]} = 36.51$$

Se observa que los factores de seguridad son elevados pues la masa máxima a transportar no es considerable, además en el eje X según la tabla 9 de longitudes y diámetros se podría usar un diámetro de 12 [mm] pero se eligió trabajar con un diámetro de 16 [mm] para tener el mismo paso que en el eje Y, y de esta forma simplificar el control de velocidad y desplazamiento del manipulador. Además, dicho diámetro de eje está disponible en el mercado nacional por lo cual se abaratan costos de importación.

- **Cálculo del par de torsión de rotación:**

Como el sistema no tendrá precarga en los husillos, el único par considerado para este cálculo será el par de torsión de fricción debido a una carga externa.

$$T_t = T_1$$

$$T_1 = \frac{F_a * Ph}{2\pi * \eta} * A \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$T_1 \rightarrow$ Par de torsión de fricción debido a una carga externa [N – mm]

$F_a \rightarrow$ Carga aplicada [N]

$Ph \rightarrow$ Paso del husillo de bolas [mm]

$\eta \rightarrow$ Eficiencia del husillo de bolas (0 – 0.95)

$A \rightarrow$ Proporción de reducción

$$A = \frac{\text{diámetro husillo}}{\text{diámetro eje motor}}$$

Par de torsión para el eje X:

$$T_1 = \frac{3.19 [N] * 5 [mm]}{2\pi * 0.95} * \frac{16[mm]}{6.35[mm]}$$

$$T_1 = 6.73 [N - mm]$$

$$T_1 = 6.73 * 10^{-3} [N - m]$$

Par de torsión para el eje Y:

$$T_1 = \frac{214.52[N] * 5 [mm]}{2\pi * 0.95} * \frac{16[mm]}{8[mm]}$$

$$T_1 = 359.39 [N - mm]$$

$$T_1 = 0.359 [N - m]$$

3.1.5. Selección de motores

Para la selección del motor impulsor, el manual recomienda duplicar el par de torsión requerido para garantizar la seguridad y revisar la curva de Torsión vs. Velocidad del motor, para verificar que el motor funcione a la velocidad y torque establecido.

- **Selección motor eje X**

En primer lugar, se debe multiplicar por dos el par de torsión calculado para el eje X.

$$T_1 = 0.673 [N - cm] * 2$$

$$T_1 = 1.35 [N - cm]$$

Observamos la figura 19 de Torsión vs. Velocidad tomando en cuenta que la velocidad máxima de rotación del husillo X calculada fue de $N_1 = 2842.30 [RPM]$, por lo tanto la velocidad máxima a la que llegará el husillo será de:

$$N_{HusilloX} = 2842.30 [RPM] * \frac{16 [mm]}{6.35 [mm]}$$

$$N_{HusilloX} = 7161.7 [RPM]$$

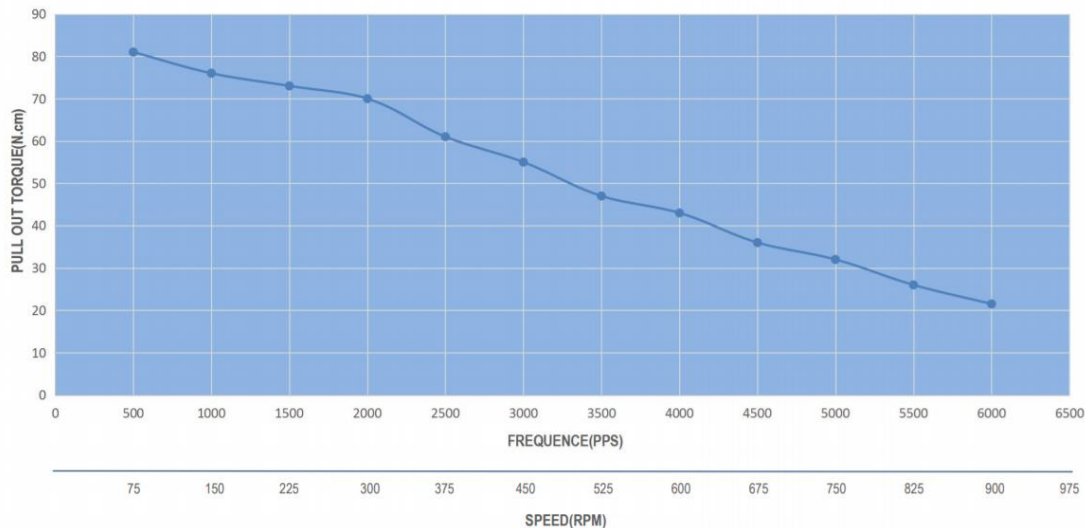


Figura 19. Gráfica Torsión-Velocidad motor a pasos NEMA 23 (1.26 [Nm])

Fuente: (Husillo de Bolas Catálogo General THK, 2018)

Como observamos en la figura 19, el motor seleccionado llega a un máximo de 900 [RPM] generando un torque de aproximadamente 20 [N-cm] cubriendo ampliamente el par de torsión necesario para mover el husillo, además la velocidad de trabajo que brindará es alta, sin llegar a la velocidad crítica para el eje diseñado. Con el motor seleccionado se obtendrá la velocidad lineal máxima del eje X.

$$v_{Xmax} = \frac{N}{\frac{16[mm]}{6.35[mm]}} * Ph$$

$$v_{Xmax} = \frac{900 [RPM]}{\frac{16[mm]}{6.35[mm]}} * 5[mm]$$

$$v_{Xmax} = 1785.93 [mm/min]$$

$$v_{Xmax} = 1.79 [m/min]$$

- **Selección motor eje Y**

En primer lugar, se multiplicará por dos el par de torsión calculado para el eje Y.

$$T_1 = 35.93 [N - cm] * 2$$

$$T_1 = 71.86 [N - cm]$$

Observamos la gráfica de Torsión vs. Velocidad, mostrado en la figura 20, tomando en cuenta que la velocidad máxima de rotación del husillo Y calculada fue de $N_1 = 4364.19 [RPM]$, por lo tanto la velocidad máxima a la que llegará el husillo será de:

$$N_{HusilloY} = 4364.19 [RPM] * \frac{16 [mm]}{8 [mm]}$$

$$N_{HusilloY} = 8728.38 [RPM]$$

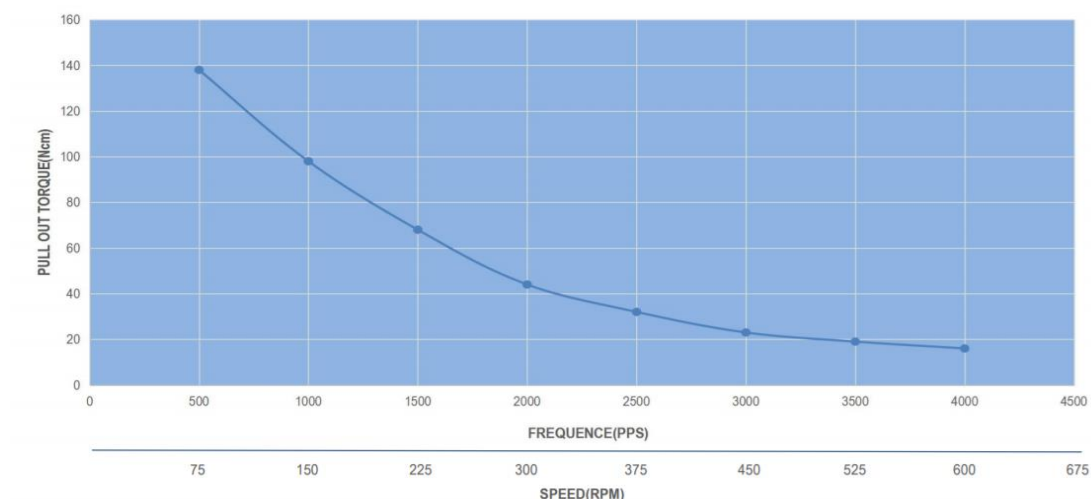


Figura 20. Curva Velocidad vs. Torque motor a pasos NEMA 23 (1.89 [Nm])

Como se observa en la figura 20, el motor seleccionado llega a un máximo de 225 [RPM] generando un torque de aproximadamente 71.2 [N-cm], velocidad de trabajo que brindará es extremadamente baja con relación a la velocidad crítica que soporta el husillo, considerando este problema de velocidad y la necesidad que el eje Y se desplace de manera uniforme considerando su longitud de carrera, se decide usar dos husillos con sus respectivos motores para el eje Y. Al usar dos motores, el torque necesario se divide para dos teniendo $T_1 = 35.93 [N - cm]$ para cada motor, entonces se tiene una velocidad máxima de aproximadamente 375 [RPM] según la curva del motor. La velocidad lineal máxima del eje Y será aproximadamente:

$$v_{Ymax} = \frac{N}{\frac{16[mm]}{8[mm]}} * Ph$$

$$v_{Ymax} = \frac{375 [RPM]}{\frac{16[mm]}{8[mm]}} * 5[mm]$$

$$v_{Ymax} = 937.5 [mm/min]$$

$$v_{Ymax} = 0.94 [m/min]$$

3.1.6. Diseño estructural del eje de movimiento X del robot

Una vez seleccionada el tipo de transmisión y dimensionados los husillos de potencia con sus respectivos motores, por sencillez de ensamblaje y disponibilidad en el mercado se ha decidido usar guías lineales circulares de 16 [mm] de diámetro para el eje Y y guías de 12 [mm] de diámetro para el eje X; mientras que para el eje Z se usarán guías lineales planas, pues en dicho eje se usará un husillo CNC de 4 entradas de 8 [mm] de diámetro, por facilidad de montaje.

Por la configuración de los ejes de movimiento del robot cartesiano el eje X será el que esté expuesto a mayor esfuerzo, pues es el eje de mayor longitud y tendrá un esfuerzo flector por la carga del objeto a almacenar, el pallet y la estructura del eje Z.

3.1.7. Diseño de pallets

Se tendrá cuatro tipos de pallet, es decir un pallet por cada tipo de espacio de almacenamiento, pero se realizará el diseño del pallet que albergará objetos de 150x150x150 [mm] pues será el que soporte mayor carga.

Los datos que se tendrá para el diseño serán las dimensiones del pallet propuesto, mismos que muestran en la figura 21, el módulo de fluencia de la madera de pino y la masa máxima que soportará el pallet.

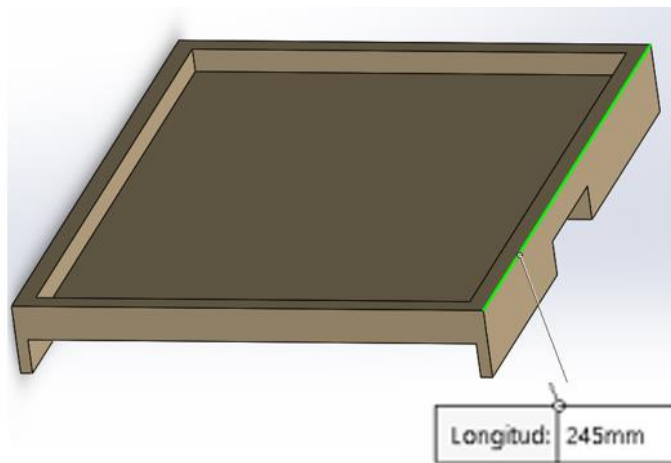


Figura 21. Dimensión frontal del pallet

Datos

$$L = 190 \text{ [mm]}$$

$$S_y = 9.6 \text{ [MPa]}$$

$$m_{\text{ObjetoMax}} = 3.45 \text{ [Kg]}$$

En primer lugar se calcula un esfuerzo de diseño con un factor de seguridad de dos.

$$\sigma_D = \frac{S_y}{N}$$

Ec. 12

Donde:

$S_y \rightarrow$ Límite de fluencia [MPa]

$N \rightarrow$ Factor de seguridad

$$\sigma_D = \frac{9.6[\text{MPa}]}{2}$$

$$\sigma_D = 4.8 [\text{MPa}]$$

Para calcular el esfuerzo por flexión que tendrá el pallet se necesita sacar el momento flector máximo, para ello se utilizará el software MDSolids, los datos obtenidos se muestran en la figura 22.

$$w_{max} = 3.45 [\text{Kg}] * 9.8 [\text{m/s}^2]$$

$$w_{max} = 33.81 [\text{N}]$$

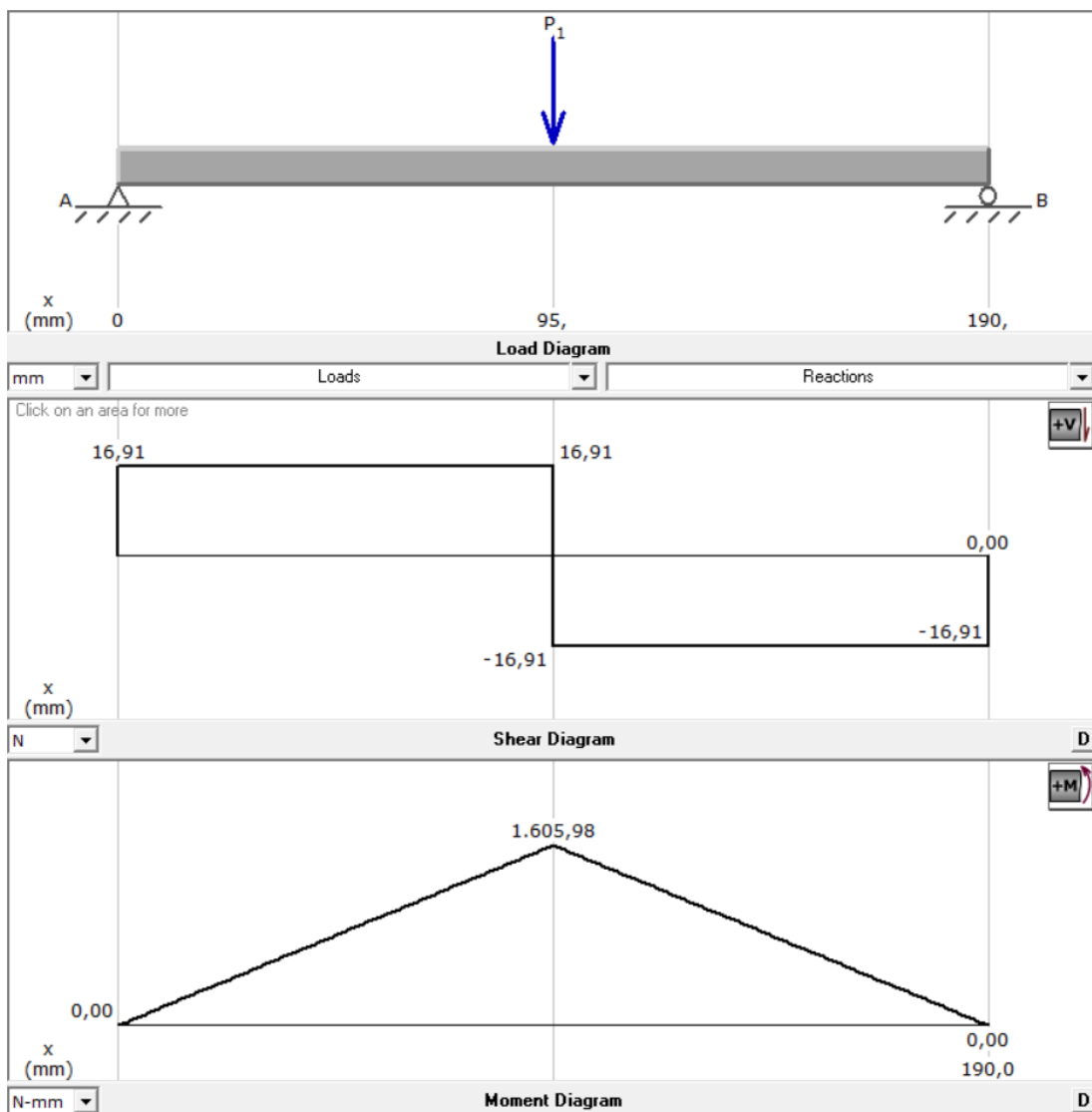


Figura 22. Datos obtenidos mediante MdSolids

Se procede a calcular el espesor de la base del pallet:

$$h = \sqrt{\frac{6 * M_{max}}{b * \sigma_D}} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$h \rightarrow$ Altura de la sección transversal [mm]

$M_{max} \rightarrow$ Momento flector máximo [N – mm]

$b \rightarrow$ Base de la sección [mm]

$$h = \sqrt{\frac{6 * 1605.98[Nmm]}{245[mm] * 4.8[N/mm^2]}}$$

$$h = 2,86 [mm]$$

Como se observa el resultado es aproximadamente 3 [mm] de altura, por disponibilidad en el mercado se utilizará una altura de 5 [mm].

El siguiente paso es calcular el módulo de sección que tendrá la base del pallet:

$$S_x = \frac{b * h^2}{6} \quad \text{Ec. 14}$$

$$S_x = \frac{245 [mm] * (5 [mm])^2}{6}$$

$$S_x = 1020.83 [mm^3]$$

Se procede a calcular el esfuerzo por flexión que tendrá la base del pallet:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{S_x} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\sigma = \frac{1605.98 [Nmm]}{1020.83 [mm^3]}$$

$$\sigma = 1.57 [MPa]$$

El factor de seguridad del pallet será de:

$$N = \frac{\sigma_D}{\sigma}$$

$$N = \frac{9.6 [MPa]}{1.57 [MPa]}$$

$$N = 6.11$$

Ec. 16

Finalmente se realizará el estudio estático en SolidWorks para comprobar el cálculo realizado, los resultados obtenidos se muestran en la figura 23:

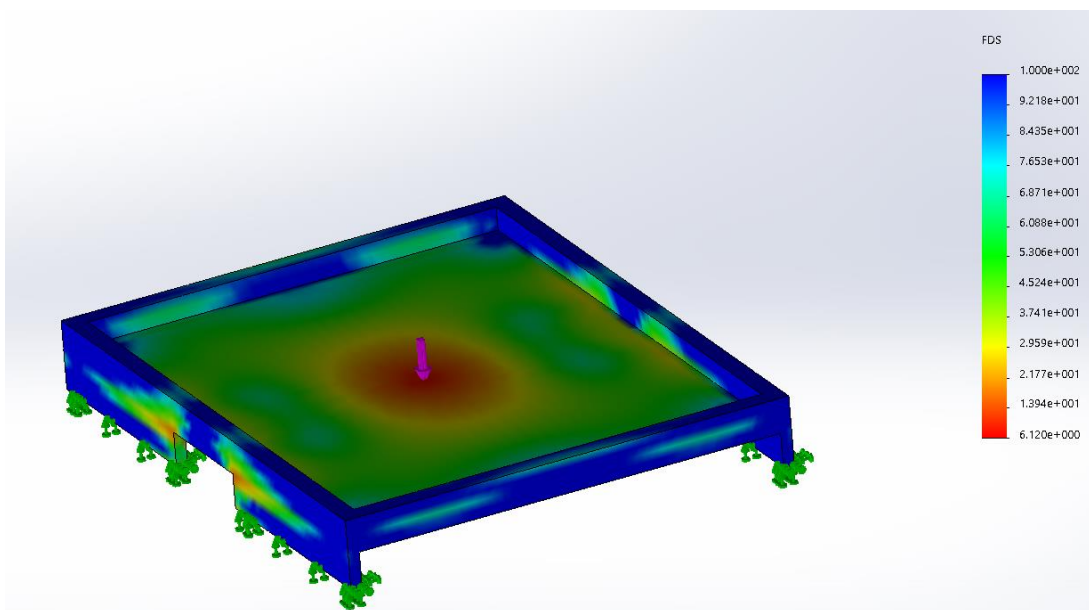


Figura 23. Resultado del análisis estático del pallet.

Como se observa en la figura 23, se tiene un factor de seguridad mínimo de 6.31, con esto se valida los cálculos anteriores.

Al diseñar el pallet que estará expuesto a un mayor esfuerzo, por el peso que soportará y por la longitud de su base, se considera que al utilizar los mismos materiales (por disponibilidad) para el resto de *pallets* el diseño será seguro.

3.1.8. Diseño de horquillas

Se denomina horquillas a la pieza del AS/RS que estará acoplada al eje Z del robot cartesiano, la misma cumplirá la función de transportar los pallets en el proceso de almacenamiento y recuperación. (ver figura 24)

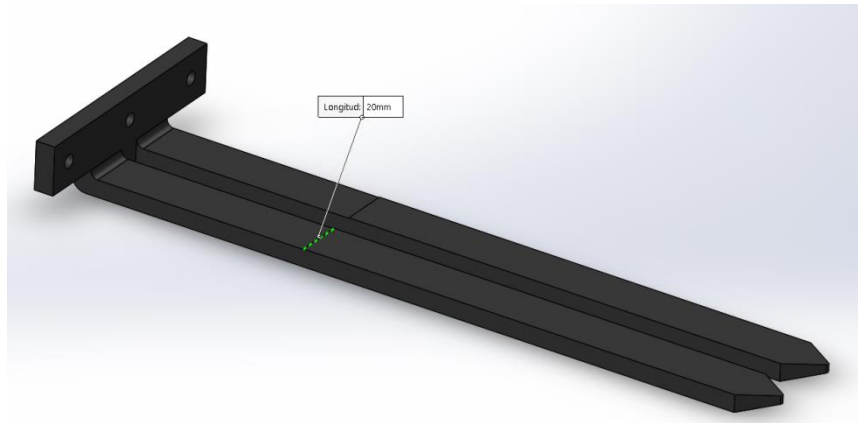


Figura 24. Horquilla

Datos

$$L = 300 \text{ [mm]}$$

$$S_y = 250 \text{ [MPa]}$$

$$m_{ObjetoMax} = 3.45 \text{ Kg}$$

$$m_{PalletMax} = 0.204 \text{ Kg}$$

En primer lugar, se calcula la carga total que soportarán las horquillas:

$$m_{Total} = 3.45 \text{ [Kg]} + 0.204 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Total} = 3.65 \text{ [Kg]}$$

$$P_{Total} = 3.65 \text{ [Kg]} * 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$P_{Total} = 35.81 \text{ [N]}$$

Como son dos horquillas la carga se distribuirá en cada horquilla por lo tanto el estudio se lo llevará a cabo con una carga de 17.9 [N] en MDSolids. Como se observa en la figura 25, se tiene un momento flector máximo de 32220 [N mm].

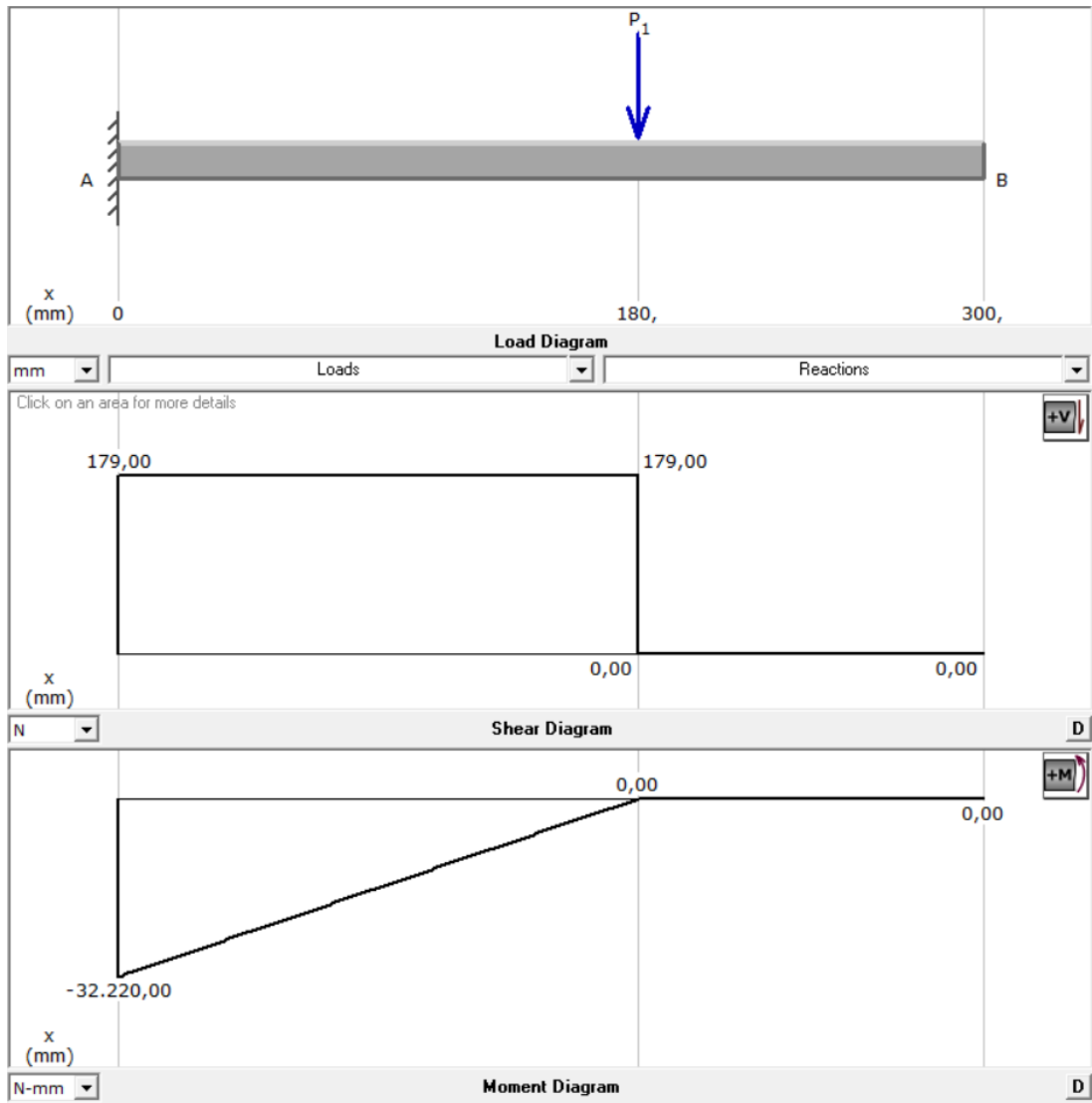


Figura 25. Resultados obtenidos de momento flector máximo

El esfuerzo de diseño será:

$$\sigma_D = \frac{S_y}{N}$$

Ec. 17

Donde:

$S_y \rightarrow$ Límite de fluencia [MPa]

$N \rightarrow$ Factor de seguridad

$$\sigma_D = \frac{250 \text{ [MPa]}}{2}$$

$$\sigma_D = 125 \text{ [MPa]}$$

El espesor que debería tener cada horquilla será de:

$$h = \sqrt{\frac{6 * M_{max}}{b * \sigma_D}}$$

Ec. 18

Donde:

$h \rightarrow$ Altura de la sección transversal [mm]

$M_{max} \rightarrow$ Momento flector máximo [N – mm]

$b \rightarrow$ Base de la sección [mm]

$$h = \sqrt{\frac{6 * 3222 \text{ [Nmm]}}{20 \text{ [mm]} * 125 \text{ [N/mm}^2\text{]}}}$$

$$h = 2,78 \text{ [mm]} \approx 3 \text{ [mm]}$$

Como las horquillas son en teoría el efector final del robot cartesiano, es un requerimiento que la flexión en el extremo, como se muestra en la figura 26, no sea considerable, pues al flexionarse en exceso el robot perdería precisión. Por lo tanto se calcula la flexión máxima en C por medio de la ecuación 19.

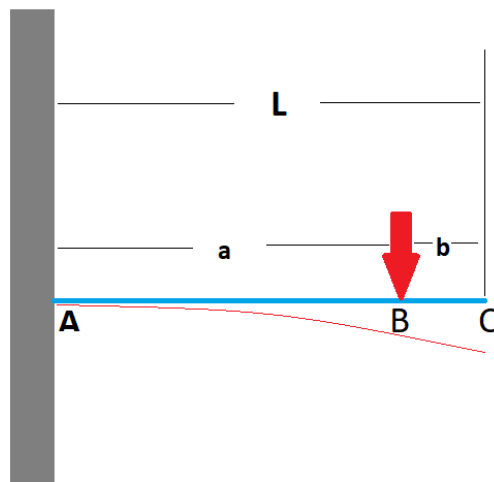


Figura 26. Flexión en un extremo

$$y_c = \frac{-P * a^2}{6 * E * I} * (3L - a) \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

P_{Total} → Carga total aplicada en B [N]

a → Distancia de A – B [mm]

E → Modulo de Young [GPa]

I → Inercia de la sección transversal [mm⁴]

$$I = \frac{b * h^3}{3} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

b → base de la sección transversal [mm]

h → altura de la sección transversal [mm]

$$I = \frac{20[\text{mm}] * (3 [\text{mm}])^3}{3}$$

$$I = 180 [\text{mm}^4]$$

Para calcular la flexión máxima en C se tomará como material un acero con módulo de Young 200 [GPa].

$$y_c = \frac{-17.9 [\text{N}] * (180 [\text{mm}])^2}{6 * 200000 [\text{MPa}] * 180 [\text{mm}^4]} * (3 * (300 [\text{mm}]) - 180 [\text{mm}])$$

$$y_c = -1.93 [\text{mm}]$$

Se verifica si la flexión máxima calculada se encuentra en los rangos recomendados por (Mott, 1992) en la tabla 15:

Tabla 15

Flexión máxima recomendados

$\frac{y_{max}}{L}$	(0.0005 – 0.003) Parte general de una máquina
---------------------	---

CONTINÚA 

$\frac{y_{max}}{L}$	(0.00001 – 0.0005) Precisión moderada
$\frac{y_{max}}{L}$	(0.000001 a 0.00001) Alta precisión

Fuente: (Mott, 1992)

$$\rightarrow \frac{1.93 [mm]}{300 [mm]}$$

$$\rightarrow 0.0064$$

Si bien una altura de 3 [mm] cumple con el factor de seguridad de 2, se observa que existe una flexión considerable y no cumple con los límites de flexión recomendados para una parte general de máquina, por lo cual se aumenta la altura a 8 [mm] (se plantea fabricar, tomando en cuenta costos, la horquilla mediante corte plasma de una plancha de acero de 8 [mm] de espesor).

$$I = \frac{20[mm] * (8 [mm])^3}{3}$$

$$I = 3413.33 [mm^4]$$

$$y_c = \frac{-17.9 [N] * (180 [mm])^2}{6 * 200000 [MPa] * 3413.33 [mm^4]} * (3 * (300 [mm]) - 180 [mm])$$

$$y_c = -0.10 [mm]$$

Se verifica si la flexión máxima calculada se encuentra en los rangos recomendados por (Mott, 1992) en la tabla 15:

$$\rightarrow \frac{0.1 [mm]}{300 [mm]}$$

$$\rightarrow 0.00033$$

Ahora la horquilla cumple con el límite de flexión recomendado para partes de precisión moderada de acuerdo a la tabla, por lo cual se acepta el diseño.

El último paso es calcular el nuevo factor de seguridad:

$$8 [mm] = \sqrt{\frac{6 * 3222 [Nmm]}{20 [mm] * \sigma_D [N/mm^2]}}$$

$$\sigma_D = 15.10 [N/mm^2]$$

$$15.10 = \frac{250 [MPa]}{N}$$

$$N = 16.56$$

Para validar el resultado realizamos el estudio estático en SolidWorks. Como se observa en la figura 27 se obtiene prácticamente el mismo factor de seguridad calculado.

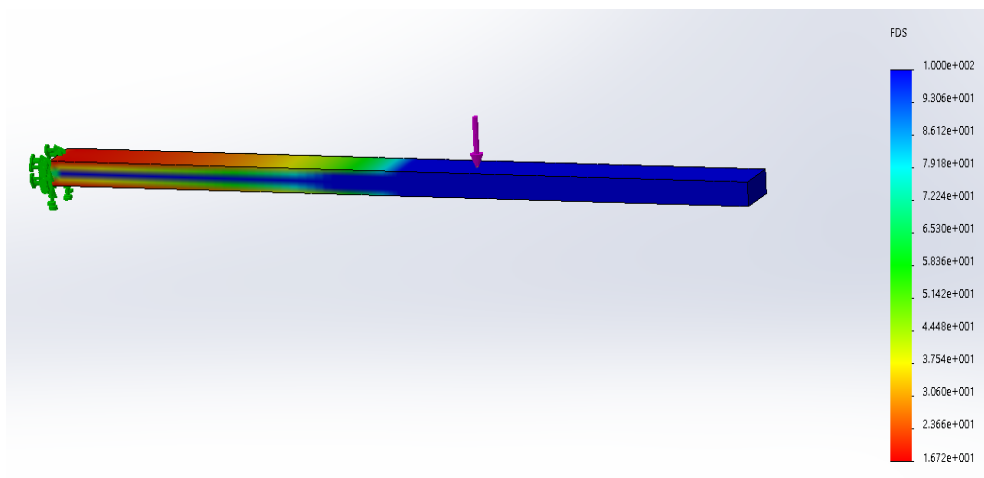


Figura 27. Análisis estático de la horquilla

Finalmente se realizará el estudio estático de la pieza en su totalidad para validar el diseño final.

En la figura 28 se puede apreciar el factor de seguridad que tendrán las horquillas con carga crítica ($N=5.4$), si bien el factor de seguridad disminuyó con respecto al de una horquilla en solitario, el diseño sigue siendo seguro. El cambio de factor de seguridad se debe al empotramiento real que tendrán las horquillas.

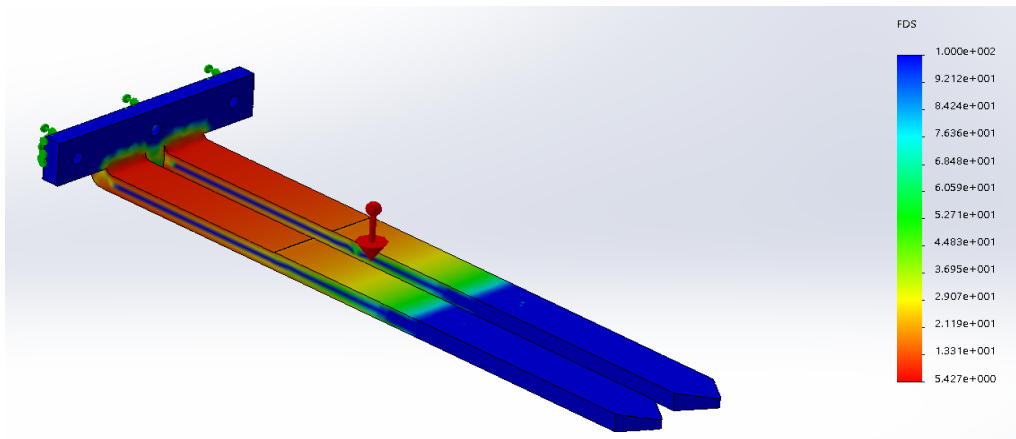


Figura 28. Factor de seguridad de la horquilla

La figura 29 muestra una flexión máxima de 0.907 [mm] en el extremo de la horquilla con carga crítica, para validar el diseño tomaremos en cuenta los parámetros que sugiere (Mott, 1992) con respecto a los límites de flexión recomendados en base a aplicaciones.

$$\rightarrow \frac{0.907 \text{ [mm]}}{300 \text{ [mm]}}$$

$$\rightarrow 0.003$$

El coeficiente calculado entra en el rango admitido para partes generales de una máquina, por lo cual se acepta el diseño.

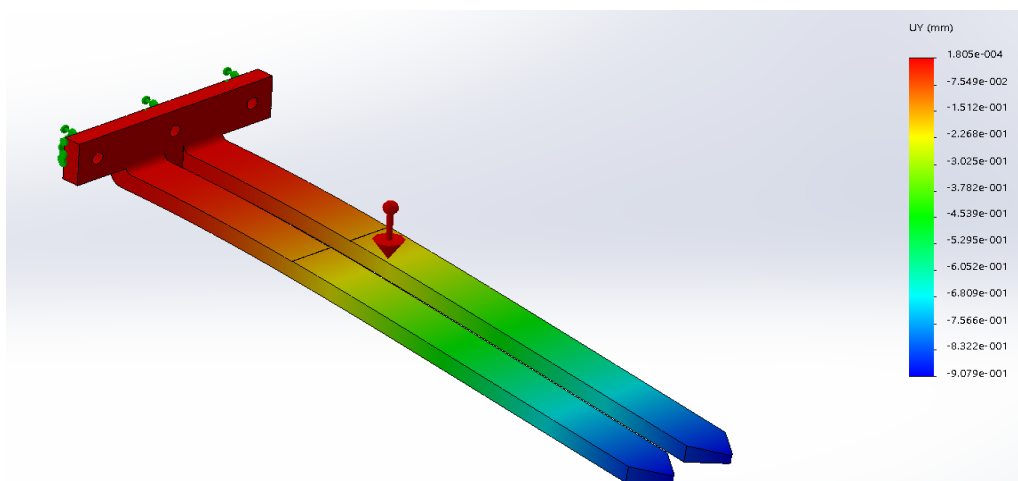


Figura 29. Flexión máxima

3.1.9. Diseño del eje X

Para culminar el diseño del eje X se dimensionarán las bases que actuarán como viga siendo el soporte de las guías lineales circulares, soportando la carga del objeto a guardar, del pallet y la carga de todo el eje Z (este dato se determinará en SolidWorks una vez ensamblado el eje).

Se partirá desde el diseño de una de las vigas con empotramiento fijo en ambos extremos, cuya carga crítica será cuanto se desee guardar un objeto de 150x150x150 [mm] y el carro Z esté ubicado en el centro del eje X.

Datos

$$L = 1100 \text{ [mm]}$$

$$S_y = 269 \text{ [MPa]}$$

$$m_{ObjetoMax} = 3.45 \text{ [Kg]}$$

$$m_{PalletMax} = 0.204 \text{ [Kg]}$$

$$m_{PalletMax} = 0.204 \text{ [Kg]}$$

$$m_{EjeZ} = 6.5 \text{ [Kg]}$$

Donde:

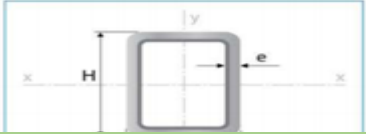
$S_y \rightarrow$ Límite de fluencia [MPa]

$N \rightarrow$ Factor de seguridad

Para el diseño se elegirá un tubo comercial de acero rectangular de 40 [mm] de base, por 20 [mm] de altura y espesor 2 [mm], cuyas características se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16

Propiedades tubos cuadrados

	Propiedades Estáticas		
	Designaciones	Área	Peso
	Eje x-x		Eje y-y

CONTINÚA 

					Momento de Inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de Inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
B	H	e	A	P	I	W	i	I	W	i
mmmm	mm	cm2	kg/m	cm4	cm3	cm	cm4	cm3	cm	
20	40	1,40	1,55	1,22	3,09	1,55	1,41	1,04	1,04	0,82
		1,50	1,65	1,30	3,27	1,63	1,41	1,10	1,10	0,82

Fuente: (Mott, 1992)

Además de otras características que se pueden observar en la figura 30.

TUBOS ACERO A500

El tubo cuadrado de acero estructural laminado al caliente (LAC), presenta una soldadura interna con el sistema ERW. Son ampliamente utilizados en el mantenimiento industrial, implementos agrícolas, equipos de transporte, ornamental, etc.

Especificaciones: ASTM A500, AISI A500

Fácil de soldar, cortar, dar forma y maquinar. Longitud 6 metros.

Propiedades Mecánicas		
	Límite de Fluencia (Mpa) mín.	269
	Resistencia a la Tracción (Mpa) mín.	310
	Elongación Probeta 8"	25.0% mínimo

Figura 30. Propiedades mecánicas Tubo de Acero A500

El momento flector máximo para una de las vigas será (Ver figura 31):

$$m_{Total} = 3.45[Kg] + 0.204 [Kg] + 6.5 [Kg]$$

$$m_{Total} = 10.15 [Kg]$$

Se divide para dos pues se plantea tener dos vigas como base:

$$P_{Total} = \frac{10.15 [Kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{2}$$

$$P_{Total} = 49.74 [N]$$

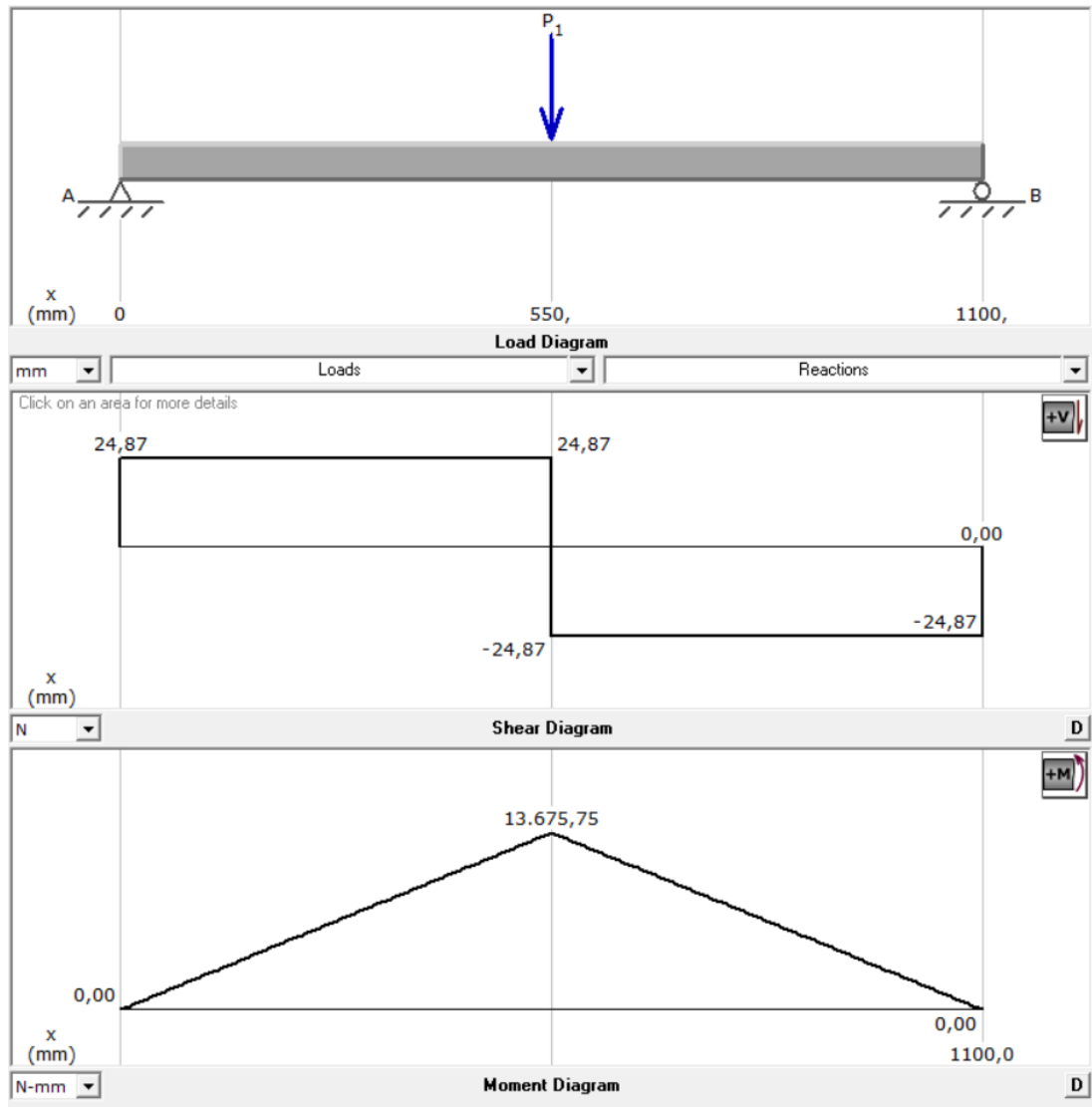


Figura 31. Momento flector máximo del soporte eje x

Considerando que el perfil se colocará teniendo como base la cara de 40 [mm], el esfuerzo por flexión será:

$$\sigma = \frac{M_{max} * c}{I}$$

Ec. 21

Donde:

M_{max} → Momento flector máximo [N – mm]

c → Distancia desde el centro de gravedad de la sección transversal,
hasta la superficie de contacto de la fuerza aplicada [mm]

I → Inercia de la sección transversal [mm⁴]

$$\sigma = \frac{13675.75 [N \text{ mm}] * 10 [mm]}{13500 [mm^4]}$$

$$\sigma = 10.13 [MPa]$$

Finalmente se calcula el factor de seguridad:

$$N = \frac{S_y}{\sigma}$$

$$N = \frac{269 [MPa]}{10.13 [MPa]}$$

$$N = 26.55$$

Se valida el diseño de la viga con SolidWorks (ver figura 32):

Nombre del modelo: vigaXSimple
Nombre de estudio: Análisis estático viga Simple X(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 27

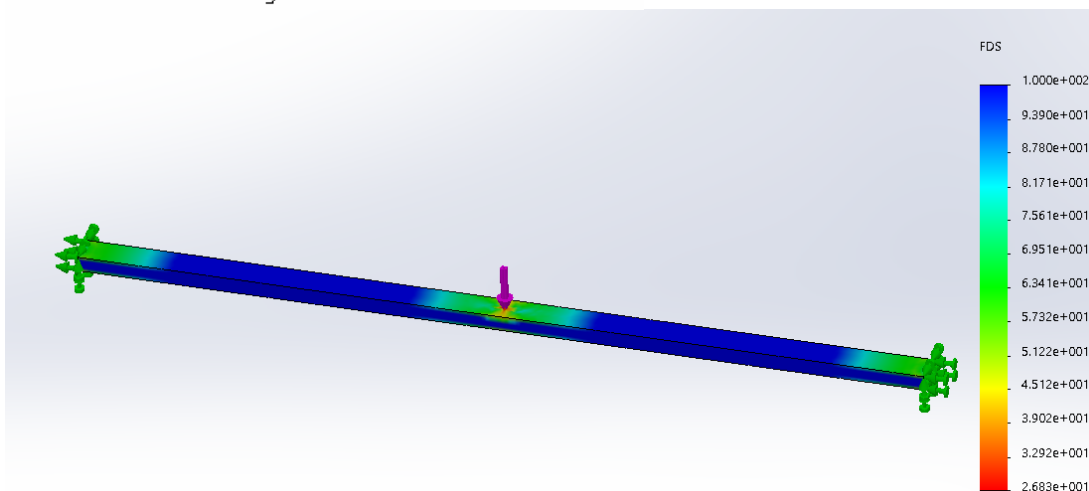


Figura 32. Factor de seguridad de la viga

Como se observa se tiene un factor de seguridad elevado de aproximadamente 27, a pesar del sobredimensionamiento se conserva el tubo cuadrado por facilidad de montaje y disponibilidad en el mercado.

Como último paso se realizará el estudio estático de la estructura completa del eje X:

Nombre del modelo: porta eje x
 Nombre de estudio: Análisis estático Estructura (-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
 Criterio: Automático
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 16

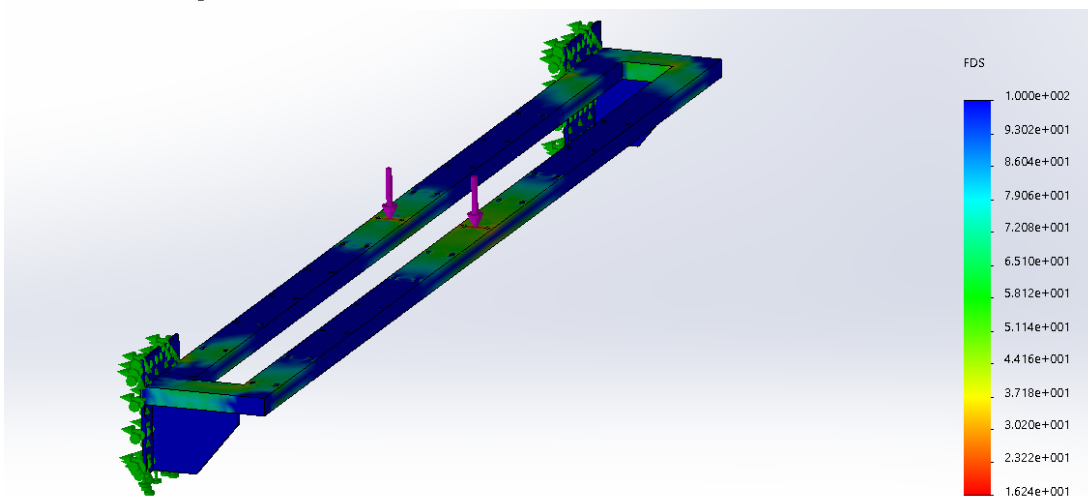


Figura 33. Factor de seguridad de la estructura base del eje x

En la figura 33 se puede apreciar que el diseño de la estructura base del eje X completa tiene un factor de seguridad de 16 por lo tanto el diseño es seguro, el factor de seguridad presenta un decremento con relación al diseño de la viga en solitario pues en la estructura completa ya se han realizado las perforaciones para ensamblar las guías lineales, presentando una concentración de esfuerzos, sobre todo en los agujeros cercanos al área de aplicación de la carga.

De igual manera se observa en la figura 34 que tiene una flexión máxima de 0.00136 [mm]. Se verifica si la flexión máxima calculada se encuentra en los rangos recomendados por (Mott, 1992) en la tabla 15:

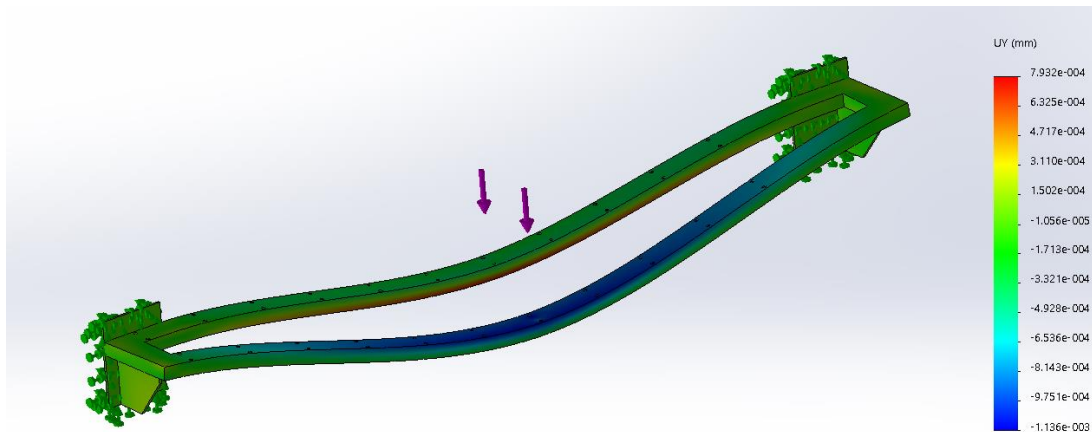


Figura 34. Datos de flexión máxima eje x

$$\rightarrow \frac{0.00136 [mm]}{1100 [mm]}$$

$$\rightarrow 0.000001$$

La pieza califica como una parte de alta precisión, por lo cual es diseño es válido.

3.1.10. Diseño de la base del AS/RS

Para diseñar la base se tiene como requerimiento que su altura sea de 780 [mm] para que esta se pueda acoplar con otras estaciones existentes en el laboratorio. Partiendo de esto se tiene como datos las dimensiones y masa de los almacenadores en conjunto con el robot cartesiano y la masa total de los objetos que serán almacenados.

Una vez diseñados los almacenadores, sistema movimiento y estructuras de soporte se procede a diseñar una mesa/base donde se sustentará todo el sistema, para ello se ha elegido tubo cuadrado de 30x30 [mm] y 2 [mm] de espesor para la estructura y un tol de 2 [mm] de espesor para cubrir la base de la mesa.

Datos

$$m_{ObjetoMax1} = 3.45 [Kg]$$

$$m_{ObjetoMax2} = 2.2 [Kg]$$

$$m_{ObjetoMax3} = 1.53 [Kg]$$

$$m_{ObjetoMax4} = 0.612 [Kg]$$

$$m_{Pallet1} = 0.204 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Pallet2} = 0.080 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Pallet3} = 0.068 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Pallet4} = 0.030 \text{ [Kg]}$$

$$m_{EjeZ} = 6.5 \text{ [Kg]}$$

$$m_{EjeX} = 11.16 \text{ [Kg]}$$

$$m_{EjeY} = 5.82 \text{ [Kg]}$$

$$m_{SoporteCentral} = 27.68 \text{ [Kg]}$$

$$m_{RepisaA} = 30.75 \text{ [Kg]}$$

$$m_{RepisaB} = 33.45 \text{ [Kg]}$$

Cálculo masa total repisa A

$$m_{TotalRepisaA} = m_{RepisaA} + (3 * m_{ObjetoMax1}) +$$

$$(5 * m_{ObjetoMax2}) + (12 * m_{ObjetoMax3}) + (12 * m_{ObjetoMax4}) + (3 * m_{Pallet1}) +$$

$$(5 * m_{Pallet2}) + (12 * m_{Pallet3}) + (12 * m_{Pallet4})$$

$$m_{TotalRepisaA} = 30.75 \text{ [Kg]} + (3 * 3.45 \text{ [Kg]}) +$$

$$(5 * 2.2 \text{ [Kg]}) + (12 * 1.53 \text{ [Kg]}) + (12 * 0.612 \text{ [Kg]}) + (3 * 0.204 \text{ [Kg]}) +$$

$$(5 * 0.080 \text{ [Kg]}) + (12 * 0.068 \text{ [Kg]}) + (12 * 0.030 \text{ [Kg]})$$

$$m_{TotalRepisaA} = 79.99 \text{ [kg]}$$

Cálculo carga total repisa A

$$P_{TotalRepisaA} = m_{TotalRepisaA} * g$$

$$P_{TotalRepisaA} = 79.99 \text{ [kg]} * 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$P_{TotalRepisaA} = 783.9 \text{ [N]}$$

Cálculo masa total repisa B

$$m_{TotalRepisaB} = m_{RepisaA} + (3 * m_{ObjetoMax1}) +$$

$$(5 * m_{ObjetoMax2}) + (12 * m_{ObjetoMax3}) + (12 * m_{ObjetoMax4}) + (3 * m_{Pallet1}) +$$

$$(5 * m_{Pallet2}) + (12 * m_{Pallet3}) + (12 * m_{Pallet4})$$

$$m_{TotalRepisaA} = 33.45 [Kg] + (3 * 3.45 [Kg]) +$$

$$(5 * 2.2 [Kg]) + (12 * 1.53 [Kg]) + (12 * 0.612 [Kg]) + (3 * 0.204 [Kg]) +$$

$$(5 * 0.080 [Kg]) + (12 * 0.068 [Kg]) + (12 * 0.030 [Kg])$$

$$m_{TotalRepisaB} = 82.69 [kg]$$

Cálculo carga total repisa B

$$P_{TotalRepisaB} = m_{TotalRepisaB} * g$$

$$P_{TotalRepisaB} = 82.69 [kg] * 9.8 [m/s^2]$$

$$P_{TotalRepisaB} = 810.36 [N]$$

Cálculo masa total estructura manipulador

$$m_{TotalManipulador} = m_{EjeZ} + m_{EjeY} + m_{EjeX} + m_{SoporteCentral}$$

$$m_{TotalCentral} = 6.5 [Kg] + 5.82 [Kg] + 11.16 [Kg] + 27.68 [Kg]$$

$$m_{TotalCentral} = 51.16 [kg]$$

Cálculo carga total estructura manipulador

$$P_{TotalManipulador} = m_{TotalManipulador} * g$$

$$P_{TotalManipulador} = 51.16 [kg] * 9.8 [m/s^2]$$

$$P_{TotalManipulador} = 501.37 [N]$$

Como las cargas que soportará la mesa esta distribuidas en diferentes lugares se procede a realizar el estudio estático del ensamble completo (figura 35) en SolidWorks.

Como se observa en la figura 36, el factor de seguridad mínimo en el diseño es de 3.4 por lo tanto el diseño es seguro y se acepta.



Figura 35 Ensamble mecánico completo AS/RS

Nombre del modelo: mesaEstudio
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 3.4

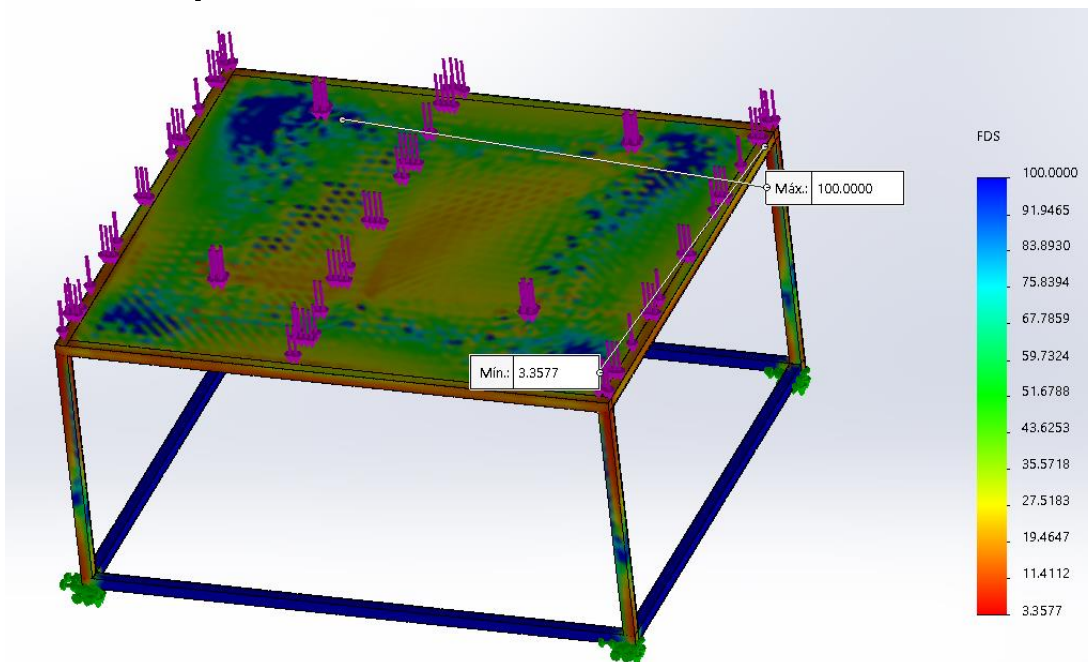


Figura 36. Factor de seguridad de la base del AS/R

3.2. Diseño Electrónico y Selección del Sistema de Control

En esta sección se realizará el diseño electrónico y selección de componentes, la electrónica del proyecto tiene como necesidades la selección de la fuente de alimentación, motores y drives para dotar de movimiento al robot de acuerdo con las especificaciones del diseño mecánico.

El control plantea desarrollar un software de visión artificial que permita identificar el tamaño de las piezas a almacenar, la programación del manipulador para controlar la movilidad del mismo de acuerdo al objeto y posición en la que se requiera almacenar, un sistema de registro que permita saber qué almacenadores están ocupados para poder recuperar los productos y finalmente un sistema HMI intuitivo y fácil de usar para el operario.

3.2.1. Selección de la Fuente de Alimentación

De acuerdo al tipo de motores y drivers que se va a utilizar, es necesario seleccionar una fuente de alimentación que proporcione las características de voltaje y corriente adecuados. En este caso los motores seleccionados NEMA 23 trabajan con un voltaje de 24V.

En el mercado existen diversas fuentes de alimentación que cumplen con dichas características de voltaje y corriente, cabe recalcar que el mecanismo S/R que para el caso es un robot de tipo cartesiano, tiene movilidad en tres ejes X, Y, Z, por lo tanto es necesario utilizar una fuente de alimentación conmutada AC/DC como se muestra en la figura 37, con tres salidas de voltaje para el correcto funcionamiento de los motores.



Figura 37. Fuente de Alimentación Conmutada AC/DC (R2-6BUR-PGPH)

Fuente: (SOLECTRO, s.f.)

En la tabla 17 se detallan las características técnicas de la fuente de Alimentación

Tabla 17

Características fuente de Alimentación conmutada AC/DC

Característica	Especificación
Denominación	XKTTSUEERCRR
Modelo	R2-6BUR-PGPH
Entrada de Voltaje	220V/110V CA
Salida de Voltaje	24V DC X3
Salida de Corriente	15 A
Potencia	360 W

3.2.2. Selección de motores

De acuerdo a la sección 3.1.5 de selección de motores de acuerdo al diseño mecánico, se optó por utilizar un motor a pasos NEMA 23 como se muestra en la figura 38, ya que el mismo proporciona los valores de torque, velocidad y sobre todo son altamente precisos, por lo tanto resultan ideales para nuestra aplicación.



Figura 38. Motor a pasos NEMA 23

Fuente: (Step Motors, 2018)

En la tabla 18 se muestran las características técnicas del motor a pasos seleccionado.

Tabla 18

Características técnicas Motor a pasos NEMA 23

Característica	Especificación
Ángulo de paso	1,8 grados
Pasos	200 por vuelta
Fases	4
Voltaje	4.5 V
Corriente	2A/fase
Diámetro del eje	8mm
Holding Torque	14kg/cm

Fuente: (Step Motors, 2018)

3.2.3. Selección de drivers

Para controlar la velocidad y posición de los motores es necesario utilizar un driver por cada uno, el mismo debe proporcionar los valores de corriente adecuados, para el correcto funcionamiento de cada motor.

Se utilizarán motores NEMA 23 con diferente torque, debido a que las cargas en los ejes varían por configuración del robot. Para el eje Y se utilizará motores de 1,89

[Nm], mientras que para el eje X, y Z se utilizará motores 1.26 [Nm], todo en base a la sección 3.1.5.

El driver seleccionado es el modelo “Driver Microstepper Motor Paso a Paso TB6600 0.2-5A 12-48VDC”, el cual se puede observar en la figura 39. Cabe recalcar que este tipo de driver es el adecuado para trabajar con los dos tipos de motores a utilizar.



Figura 39. Driver BL TB6600

Fuente: (ElectronicLab, 2018)

En la tabla 19 se puede visualizar las especificaciones técnicas del driver BL TB6600.

Tabla 19

Especificaciones técnicas driver BL TB6600

Característica	Especificación
Voltaje de entrada	DC: 8-50V (Voltaje operativo: 12V – 42V)
Corriente de entrada	1 a 5 A
Corriente de salida	5.0 A (Valor nominal máximo)

CONTINÚA →

	absoluto)
	4.5 A (Rango de operación, valor máximo)
Temperatura de funcionamiento	-10 to 45 °C
Peso	200 gramos

Fuente: (ElectronicLab, 2018)

3.2.3.1. Diagrama de conexión driver BL TB6600

El diagrama de conexión del driver del motor a pasos NEMA 23, se muestra en la figura 40.

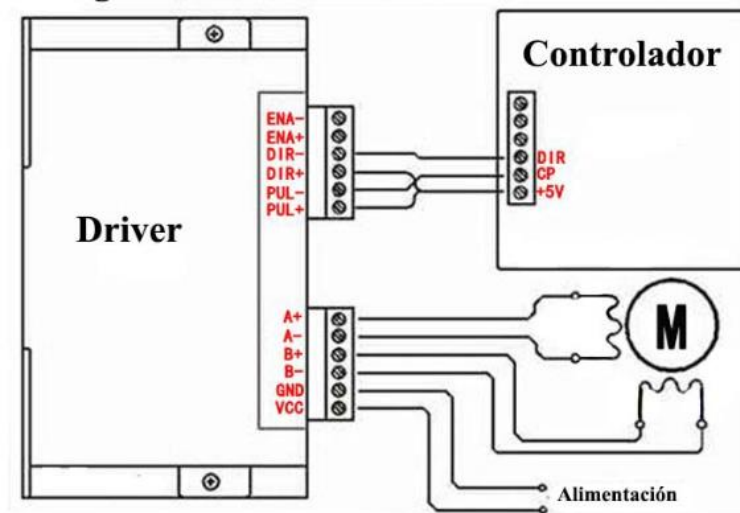


Figura 40. Diagrama de conexión Driver BL TB6600

Fuente: (ElectronicLab, 2018)

3.2.4. Selección del sistema de control

Al tratarse de un robot de tipo cartesiano, es decir cuyos tres ejes principales de control son lineales, se implementará una máquina cuyo principio de funcionamiento es el Control Numérico Computarizado (CNC).

Las máquinas CNC poseen un controlador el cual tiene la capacidad de controlar la posición y la velocidad de los motores, debido a esto tienen la capacidad de realizar movimientos circulares y diagonales, además de ser muy precisas. Estas

máquinas deben ser programadas previamente para poder ejecutar las operaciones por si sola.

Básicamente se utilizará códigos G o también conocido como lenguaje RS-274, el cual es el lenguaje de programación más utilizado en control numérico.

Para el presente proyecto se utilizará GRBL que es un software de código abierto de alto rendimiento (Open Source) optimizado para trabajar sobre placas Arduino que actúa de intérprete de códigos G. El controlador GRBL está escrito en lenguaje C optimizado el cual utiliza todas las características de los chips ATmega328P del Arduino para obtener sincronización exacta y operaciones asíncronas.

3.2.4.1. Elección de la placa de expansión CNC Shield

Debido a que se implementará el firmware GRBL, se utilizará una placa de expansión denominada CNC Shield cuyos pines se muestran en la figura 41, la cual está diseñada para ser montada sobre Arduino UNO, permite controlar hasta 4 motores a pasos, sus características se muestran en la tabla 20.

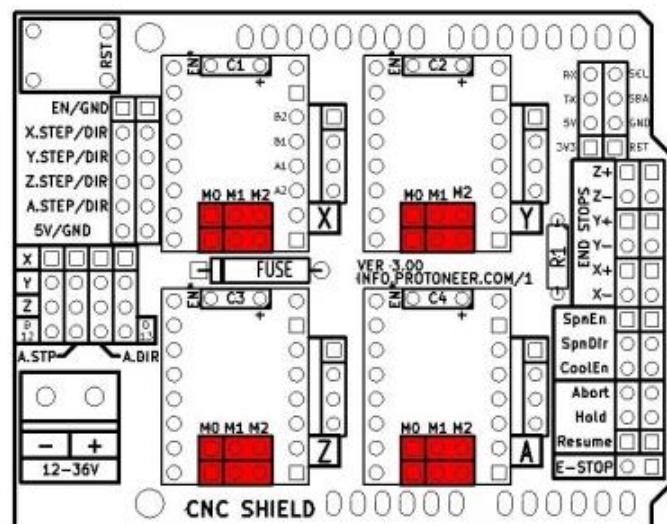


Figura 41. Pines de conexión CNC Shield

Fuente: (Handson Technology, s.f.)

Tabla 20
Características CNC Shield

Características Arduino CNC Shield v3
Compatible con GRBL
Soporte para 4 ejes (X,Y,Z,A)
2 conexiones para finales de carrera para cada eje (en total 6)
Salida "Spindle Enable" y "Direction"
Alimentación 12-36V DC

Fuente: (J TECH, 2018)

3.2.2.2 Selección de la tarjeta de control

Como se mencionó en la sección anterior, la placa de expansión está diseñada para ser montada preferentemente sobre una tarjeta Arduino UNO, por lo cual se seleccionará dicha tarjeta cuyas características se muestran en la tabla 21, además una característica interesante es que aunque esta tarjeta funcione por puerto serial realmente lo emula desde un puerto USB, lo que hace posible que se pueda controlar desde cualquier portátil.

Tabla 21
Características Arduino UNO

Característica	Descripción
Microcontrolador	AtMega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V

CONTINÚA 

Pines Digitales E/S	14 (6 PWM)
Pines analógicos de entrada	6
Corriente pin E/S	40mA
Corriente pines 3.3V	50mA
Frecuencia de reloj	16 MHz

Fuente: (ARDUINO, 2018)

Los pines de distribución desde el Arduino UNO a la CNC Shield se muestran en la figura 42:

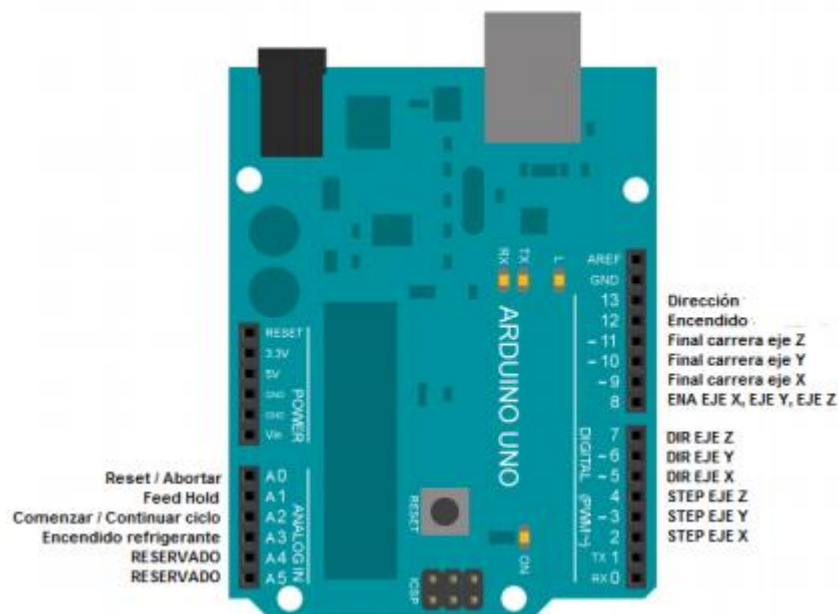


Figura 42. Distribución de pines de Arduino a CNC Shield

Fuente: (García, 2014)

3.2.3 Diseño del Circuito Electrónico

El diseño e implementación del circuito electrónico consiste en acoplar los componentes antes seleccionados de acuerdo a las especificaciones de cada uno, y verificar el correcto funcionamiento de los mismos. El circuito electrónico a

implementarse se muestra en la figura 43. Cabe recalcar que en este diagrama no se toma en cuenta aún los finales de carrera puesto a que para la implementación de los mismos se necesita un circuito adicional de filtrado.

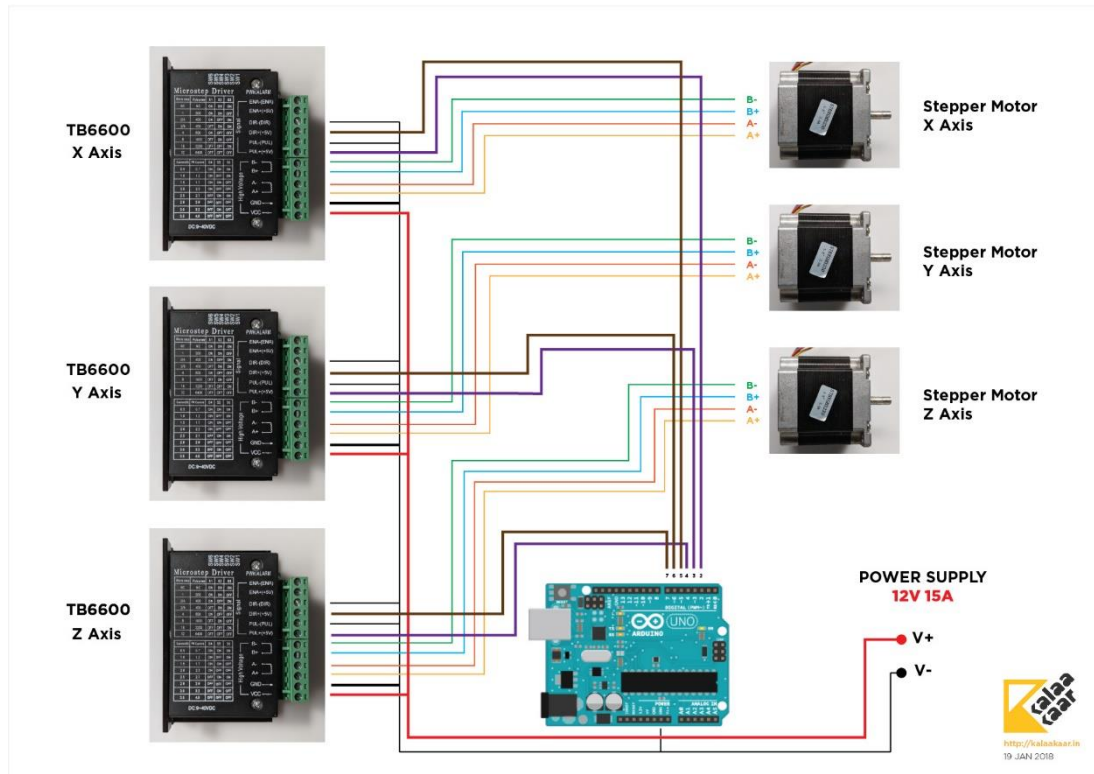


Figura 43. Circuito a implementarse

Fuente: (Kalaakaar, 2018)

3.2.3.1 Finales de Carrera

Se instalará seis finales de carrera en todo el mecanismo S/R, los cuales serán conectados en los pines X-, Y-, Z-, de la CNC Shield, además se utilizará la configuración Normalmente Cerrado (NC). Para la selección del modelo de final de carrera, simplemente se tomó en cuenta que el tamaño sea el adecuado, que sea robusto y además sea sencillo de implementar. El modelo seleccionado se observa en la figura 44.



Figura 44. Final de carrera seleccionado

Fuente: (SOLECTRO, s.f.)

Es indispensable la instalación de los finales de carrera en el robot cartesiano, ya que los mismos servirán de referencia para establecer el “HOMING”, que no es más que el punto inicial de donde partirá siempre el mecanismo S/R.

3.2.5 Selección del tipo de cámara

Para determinar las dimensiones de los objetos se utilizará como sensor cámaras web (ver figura 45), los factores a tomar en cuenta para la selección de la cámara serán el campo de visión, distancia de trabajo, longitud focal, tamaño del sensor y el detalle más pequeño a detectar.



Figura 45. Cámara Web

Fuente: (SOLECTRO, s.f.)

El campo de visión es el área del objeto que se captará por el sensor. En el presente caso será el área máxima que abarcarán las cámaras para reconocer figuras de un máximo de 150mmx150mmx150mm.

La distancia de trabajo es la distancia que existirá desde el lente de la cámara seleccionada al objeto a medir, como aún no se realiza el diseño de la estructura del

AS/RS se tomará como requerimiento que la distancia sea la mínima posible, considerando una relación de costos entre la cámara y la cantidad de material a invertir para la estructura.

La longitud focal es una característica propia de cada cámara, que determina la distancia entre el sensor y la lente, esta característica determinará el ángulo de visión de la cámara como se muestra en la figura 46, es decir cuánto se capturará de la escena fotografiada. Se debe tomar en cuenta que a mayor distancia focal se tendrá menor ángulo de visión y a menor distancia focal se obtendrá un mayor ángulo de visión.



Figura 46. Representación de la longitud focal

Fuente: (DZOOM, 2018)

El tamaño del sensor es una característica que determinará la cantidad de luz que captará el mismo, mientras se tenga mayor luz se tendrá más información codificada y esto mejorará la calidad de la fotografía. Otro de los aspectos directamente relacionado con el tamaño de sensor de la cámara es el detalle más pequeño a detectar, para el cometido de la aplicación de reconocimiento dimensional de objetos no será necesario tener imágenes con gran resolución pues al detectar muchos detalles se podría detectar contornos de acabados o tallados, de igual manera no se requiere capturar colores fieles a la realidad, el cometido del sistema de captura será distinguir el cambio de color en los píxeles del objeto a reconocer con el fondo del entorno implementado para la visión artificial.

Una vez definidos todos requerimientos de sistema de visión artificial para reconocimiento de dimensiones AS/RS se procede a buscar webcams que cumplan con dichos requisitos, tomando en cuenta la economía del proyecto. En la tabla 22

se indican las especificaciones de dos cámaras que a priori cumplirían con el requerimiento del sistema.

Tabla 22

Especificaciones técnicas de cámaras web

Identificación	Resolución	Pixeles	Lente de cristal	Ángulo de visión	Distancia Focal	Costo
Logitech C170	1.3 MP	640x480	No	58°	2.3 mm	\$ 25
i-SOURCE unlimited	2.0 MP	640X480	NO		3.85 mm	\$ 15

3.3. Programación de algoritmos de visión artificial para el reconocimiento de dimensiones.

Como se mencionó en el apartado de la selección de cámara, el requerimiento principal del sistema es determinar las medidas de la cara superior y lateral de los objetos con un rango de longitud lineal de mínimo 30mm y máximo 150mm.

Una vez definidas las condiciones del entorno y características de los sensores a usar, se procede a elegir el método idóneo para obtener dimensiones en los objetos que serán analizados. Según la teoría se puede calcular las dimensiones de objetos por visión artificial mediante visión 2D y 3D.

La visión 2D consiste en tomar la captura de un área determinada mediante una cámara, para después procesarla mediante relaciones de píxeles/área, los requisitos para aplicar este procedimiento son: tener un buen contraste, ambiente de iluminación estable y poca variación de altura. (Druzella, 2010)

La visión 3D trata de imitar al cerebro humano generando una imagen 3D como se muestra en la figura 46, con dos sensores, por ende el costo de implementación se eleva, la visión 3D es usada en entornos de contraste bajo, colores variados en escena, cuando existen grandes variaciones de altura y variación de la luz ambiental. (Druzella, 2010)



Figura 47. Ejemplo de visión en 3D

Fuente: (NVidia, 2018)

Observando las condiciones en las cuales se recomienda aplicar visión 2D y 3D, se elige usar visión 2D pues se ajusta a las condiciones del AS/RS. Como se plantea construir un ambiente para la captura de las imágenes tendremos buen contraste de colores e iluminación estable, además las cámaras estarán ubicadas en una posición fija, los objetos se colocarán siempre en la misma posición y el rango de medidas de los objetos es de 30mm a 150mm, no se tendrá mayor variación de altura entre capturas.

3.4. Descripción general del sistema de visión artificial para la captura e identificación de dimensiones

Para realizar el reconocimiento de dimensiones de cualquier objeto mediante el uso de visión artificial es necesario estructurar una serie de pasos que a manera general se describe en la figura 48.

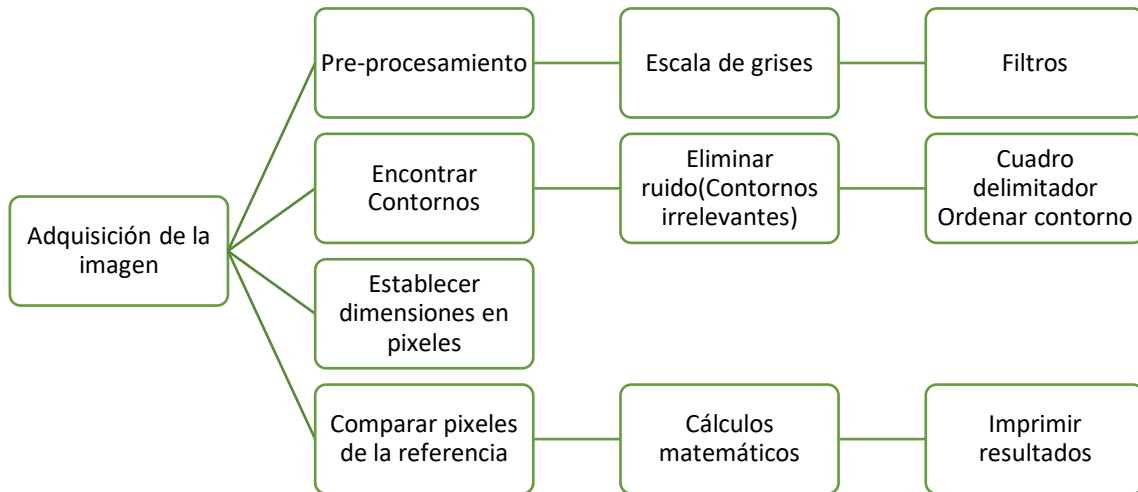


Figura 48. Descripción general del sistema de visión artificial

CAPÍTULO IV

Implementación y Configuración de componentes

4.1. Construcción mecánica

Para el ensamblaje mecánico estructural y de movimiento del AS/RS, se tomaron los siguientes pasos:

4.1.1. Construcción de los módulos de almacenamiento

Para la construcción de los módulos de almacenamiento se eligió tubo estructural cuadrado de 25[mm] y 2 [mm] de espesor como se muestra en la figura 49, los mismos que serán unidos mediante soldadura tipo SMAW, y electrodo E6011. Mientras que para las estructuras de soporte de los almacenadores se utilizó tubo estructural cuadrado de 30x30 [mm] y 2 [mm] de espesor.



Figura 49. Módulos de Almacenamiento

4.1.2. Ensamble de la base de la estructura

Se ensambló la base de la estructura, con tubo estructural cuadrado de 30 [mm] y 2 [mm] de espesor. Sobre la estructura de la mesa se acopló una base con una plancha de tol de 2 [mm] de espesor. (Ver figura 50)



Figura 50. Base de la estructura

4.1.3. Implementación de las ruedas de apoyo

Para facilidad de transportación del AS/RS, se implementó ruedas de apoyo debajo de la estructura, una en cada esquina como se muestra en la figura 51.



Figura 51. Ruedas de apoyo

4.1.4. Ensamble del Robot Cartesiano

Posteriormente, una vez seleccionados los husillos de potencia, guías lineales y motores, se ensambló el manipulador cartesiano. Primero se ensambla el eje Y, posterior el eje X y Z conjuntamente, esto se muestra en las figuras 52, 53, 54 respectivamente.



Figura 52. Ensamble del eje Y



Figura 53. Ensamble del eje X y Z

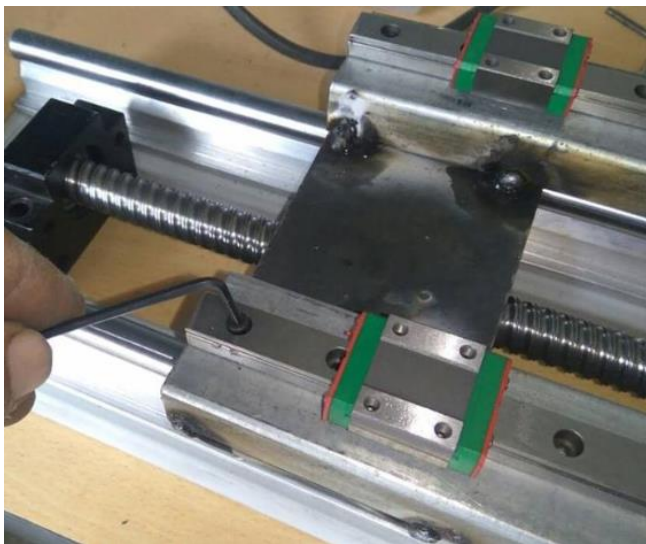


Figura 54 Ensamble eje Z

4.1.5. Acoplamiento de los motores

Se acopló los motores en los diferentes ejes del robot cartesiano, como se muestra en la figura 55.

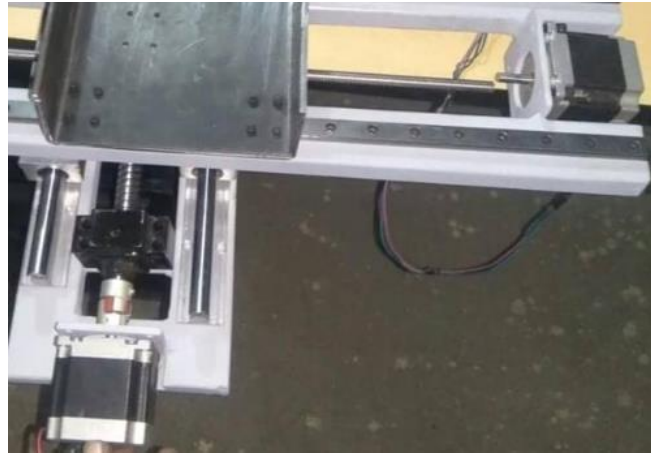


Figura 55. Acoplamiento de motores

4.1.6. Construcción de las horquillas

Se construyó las horquillas mediante corte por plasma de una plancha de acero de 8 [mm] de espesor como se muestra en la figura 56, este será el mecanismo mediante el cual el AS/RS recogerá y depositará los pallets en los módulos de almacenamiento. Posteriormente las horquillas se acoplan al carro tipo U ubicado en el eje Z como se muestra en la figura 57.



Figura 56. Construcción de las horquillas mediante corte por plasma



Figura 57. Acople de las horquillas en el eje Z

4.1.7. Implementación de los finales de carrera

Se instaló los finales de carrera, dos por cada eje, de la forma como se muestra en la figura 58. Teniendo en cuenta que los finales de carrera detengan el mecanismo si colisionar.

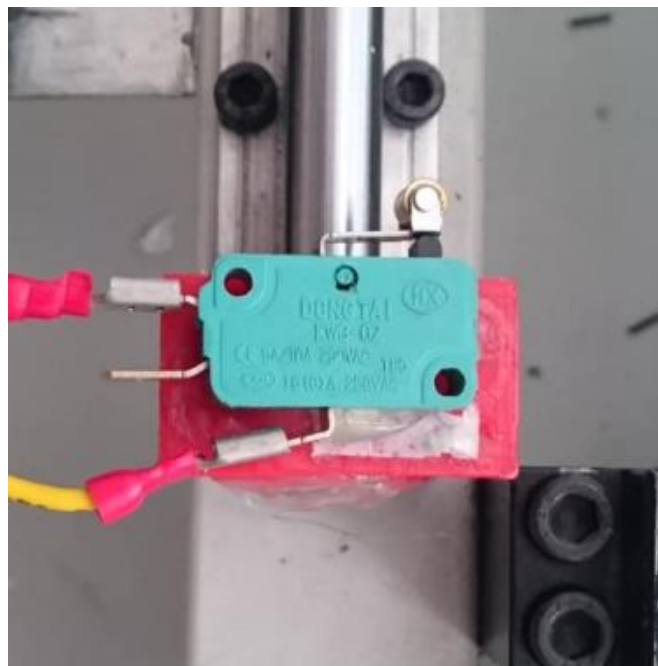


Figura 58. Acople de los finales de carrera

4.1.8. Cableado del AS/RS

Se realizó el cableado de los componentes, como motores y finales de carrera, como se muestra en la figura 59, hacia la caja de control.



Figura 59. Cableado de los componentes

4.1.9. Acabados finales del AS/RS

Como acabados finales se pintó la estructura por completo de color gris como se muestra en la figura 60. Además se cortaron y se instalaron pequeñas planchas de acrílico de 2mm de espesor, que servirán como divisiones para los almacenadores como se muestra en la figura 61.



Figura 60. Pintado de la estructura



Figura 61. Instalación de planchas de acrílico

También se colocó la caja de control como se muestra en la figura 62, con los respectivos componentes.



Figura 62. Instalación de la caja de control

4.1.10. Implementación de la zona para visión artificial

Se implementó una zona para visión artificial como se muestra en la figura 63, misma que servirá para obtener el fondo de color negro que es necesario para el sistema de visión artificial, y proporcionar las condiciones de luz adecuados.



Figura 63. Zona para visión artificial

4.2. Configuración de la tarjeta Arduino Uno

Para poder utilizar el módulo de expansión CNC *Shield*, es necesario cargar un firmware de control en la placa Arduino. GRBL es un firmware en código abierto que se ejecuta en Arduino el cual toma los códigos G a través de comunicación serial y convierte los comandos en señales para controlar los drivers del motor.

GRBL proporciona diferentes versiones que pueden ser descargadas desde su propio sitio web <https://github.com/grbl/grbl>, para el presente proyecto se va a utilizar la última versión disponible, la cual es Grbl V1.1. A continuación se carga el programa en la tarjeta Arduino siguiendo los siguientes pasos:

1. Una vez descargada la carpeta de archivos de GRBL, primero se configurará el Arduino. Se debe seleccionar la placa a utilizar que para el caso se trata de una tarjeta Arduino Uno, posteriormente se configura el puerto utilizado que actualmente es el "Com3", como se muestra en las figuras 64 y 65 respectivamente:

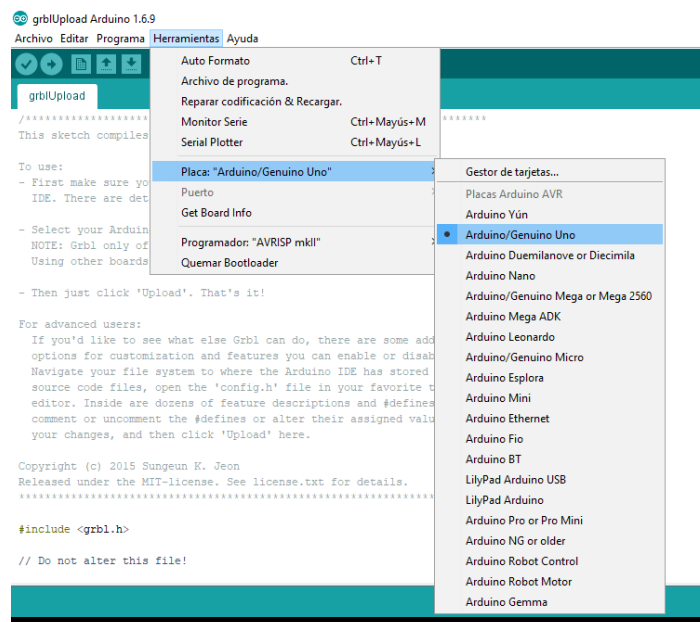


Figura 64. Selección de la placa en el software de Arduino

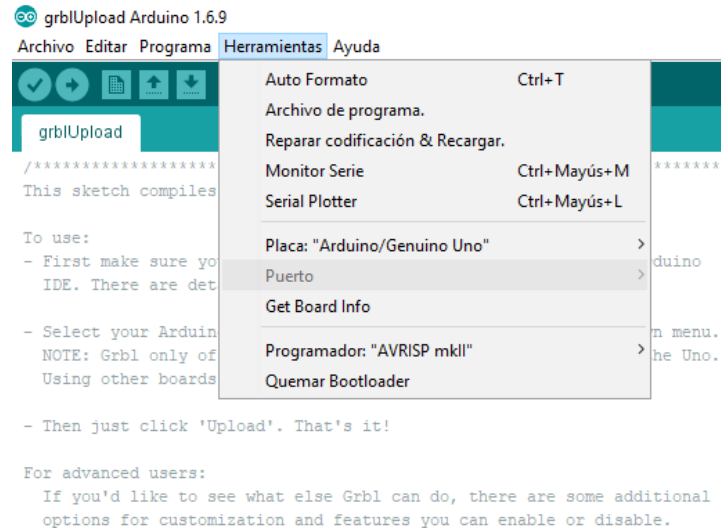


Figura 65. Selección del puerto COM

2. Se accede al archivo “grblUpload”, el cual se encuentra en la carpeta de archivos descargada de GRBL como se muestra en la figura 66:

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo
grblUpload	16/08/2017 20:55	Arduino file
license	16/08/2017 20:55	Documento de tex

Figura 66. Archivo GRBL

3. El archivo “grblUpload” se abre desde el programa de Arduino y se despliega el código que se muestra en la figura 67.


```

grblUpload Arduino 1.6.9
Archivo  Editar  Programa  Herramientas  Ayuda

grblUpload
/*****
This sketch compiles and uploads Grbl to your 328p-based Arduino!

To use:
- First make sure you have imported Grbl source code into your Arduino
  IDE. There are details on our Github website on how to do this.

- Select your Arduino Board and Serial Port in the Tools drop-down menu.
  NOTE: Grbl only officially supports 328p-based Arduinos, like the Uno.
  Using other boards will likely not work!

- Then just click 'Upload'. That's it!

For advanced users:
If you'd like to see what else Grbl can do, there are some additional
options for customization and features you can enable or disable.
Navigate your file system to where the Arduino IDE has stored the Grbl
source code files, open the 'config.h' file in your favorite text
editor. Inside are dozens of feature descriptions and #defines. Simply
comment or uncomment the #defines or alter their assigned values, save
your changes, and then click 'Upload' here.

Copyright (c) 2015 Sungeun K. Jeon
Released under the MIT-license. See license.txt for details.
*****/

#include <grbl.h>

// Do not alter this file!

```

Figura 67. Código firmware GRBL

4. Finalmente se procede a “verificar” y “subir” el programa, con lo cual ya se encuentra cargado el firmware GRBL sobre la placa Arduino Uno.

4.3. Configuración de los finales de carrera

Debido a que se utilizará solamente un pin de la CNC Shield para finales de carrera por cada eje, y en cada eje debe ser instalado dos finales de carrera (uno en cada extremo), se conecta en serie dos finales de carrera de la siguiente forma:

4.3.1. Conexión de los finales de carrera para el eje X

La conexión de los finales de carrera para el eje X, se realiza como se muestra en la figura 68.

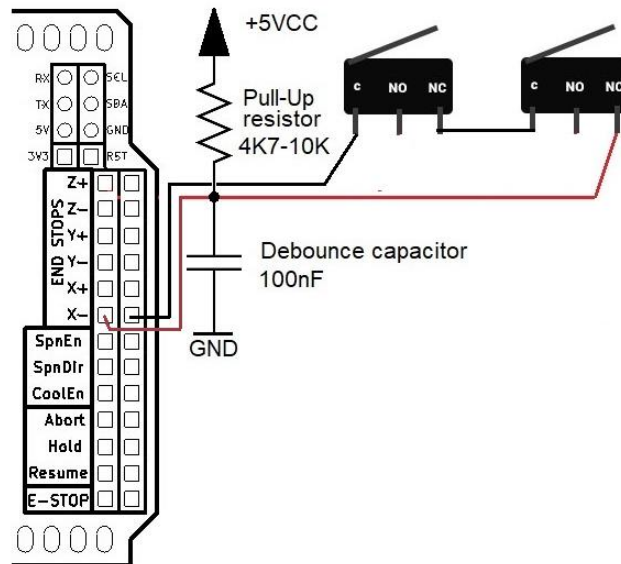


Figura 68. Finales de carrera del eje X

Fuente: (Protoneer, 2013)

4.3.2. Conexión de los finales de carrera para el eje Y

La conexión de los finales de carrera para el eje Y, se realiza como se muestra en la figura 69.

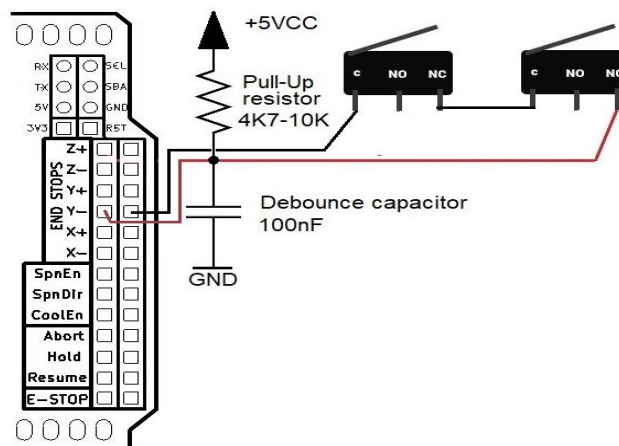


Figura 69. Finales de carrera eje Y

Fuente: (Protoneer, 2013)

4.3.3. Conexión de los finales de carrera para el eje Z

La conexión de los finales de carrera en el eje Z se conecta como se observa en la figura 70, para este caso por la versión del firmware de GRBL (V1.1), y CNC Shield versión 3, los finales de carrera se deben de conectar en el terminal “SpnEnd”.

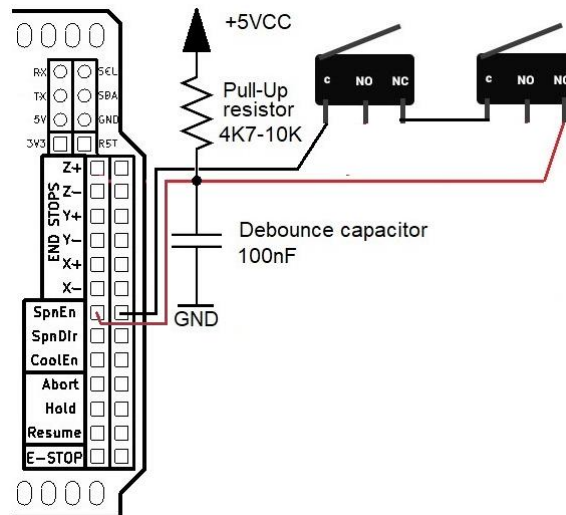


Figura 70. Finales de carrera eje Z

Fuente: (Protoneer, 2013)

4.3.4. Elaboración de la placa para el circuito de filtrado de los finales de carrera

Como se puede observar en las figuras 68, 69 y 70, la conexión de los finales de carrera requieren de un circuito de filtrado para evitar señales de rebote, este filtro está compuesto por una resistencia y un capacitor, por lo cual se elaboró una placa con dichos componentes como se muestra en la figura 71.



Figura 71. Placa circuito de filtrado

4.4. Configuración del Robot mediante el software “Universal GCode Sender”

Para la configuración de varios parámetros iniciales de la máquina se utilizará el software “Universal GCode Sender”, el cual es un remitente de Códigos G multiplataforma basado en Java. La versión utilizada es 1.0.8 y la comunicación con GRBL es por medio de serial. La interfaz de “Universal GCode Sender” se muestra en la figura 72.

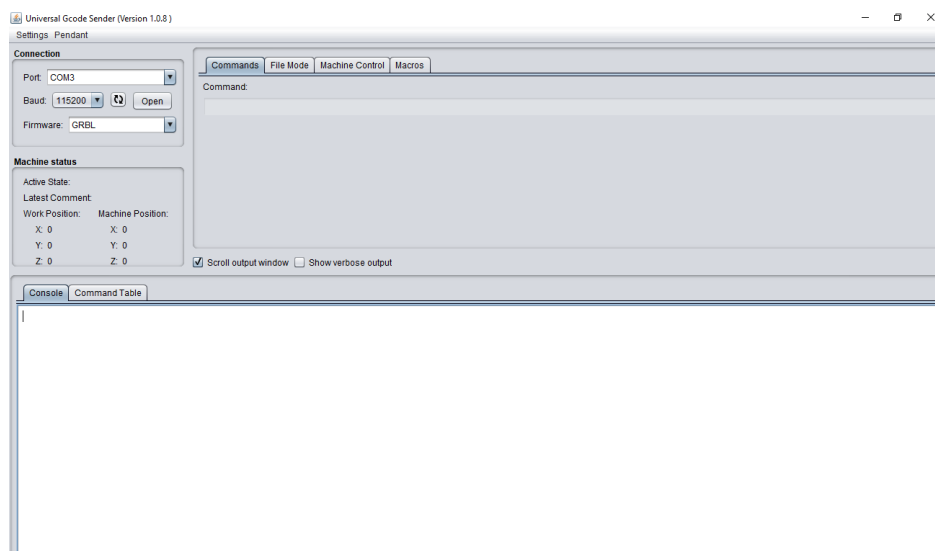


Figura 72. Interfaz Universal GCode Sender

4.4.1. Configuración para la comunicación serial.

Arduino IDE tiene la capacidad de comunicarse por serial a través del puerto USB, esto debido a que Arduino cuenta con un convertidor de serial a USB que permite a la tarjeta ser reconocida por la computadora como un dispositivo conectado a un puerto COM.

Se debe configurar el puerto, velocidad de comunicación y el firmware, que para el caso son los que se muestran en la figura 73.

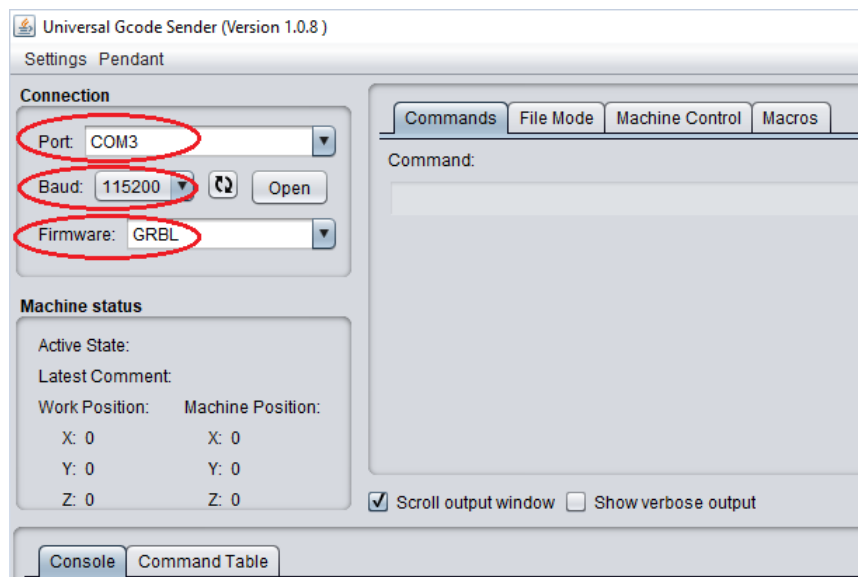


Figura 73. Parámetros de Comunicación Serial

Una vez establecida la comunicación, es necesario configurar los parámetros, los cuales se muestran digitando el comando “\$\$”, dichos parámetros deben ser configurados como se muestra en las figuras 74 y 75, respectivamente.

Para la configuración se elige primero el número de parámetro, seguido del valor correspondiente, en este caso el parámetro tres fue modificado de un valor 0 a 3 para configurar la dirección de movimiento de cada eje al tomar la posición de referencia, por lo que el comando utilizado fue “\$3=3”.

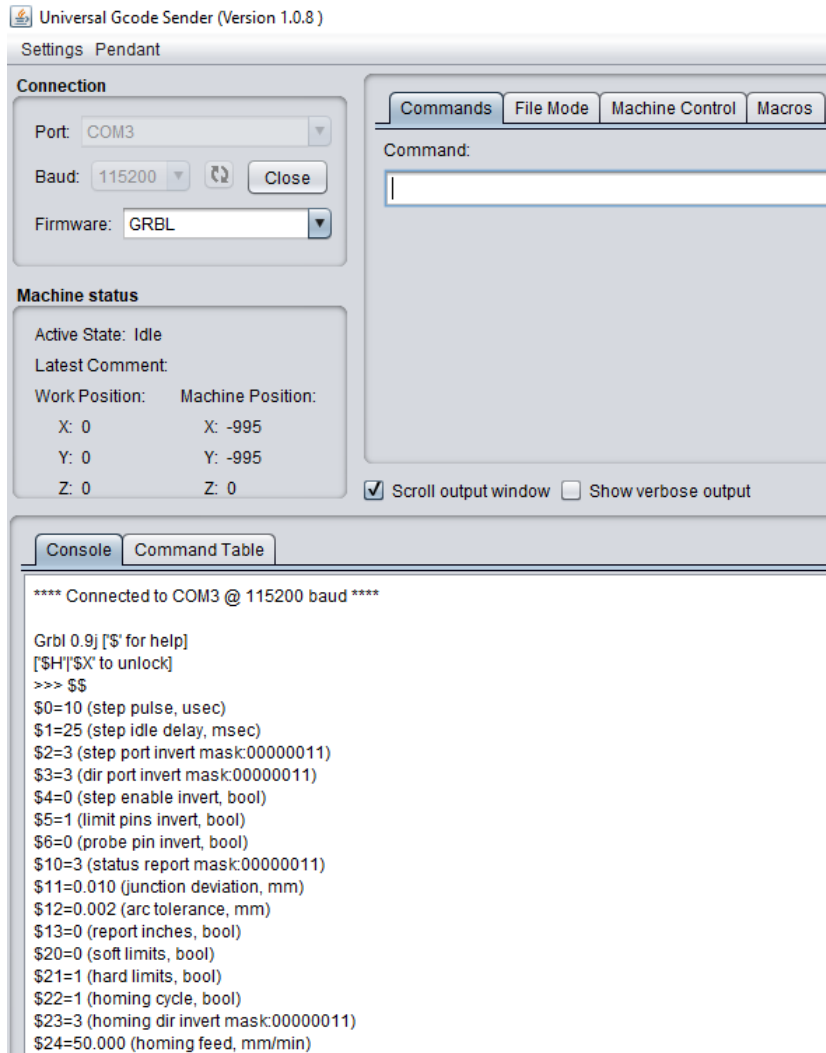


Figura 74. Parámetros de configuración GCode Sender

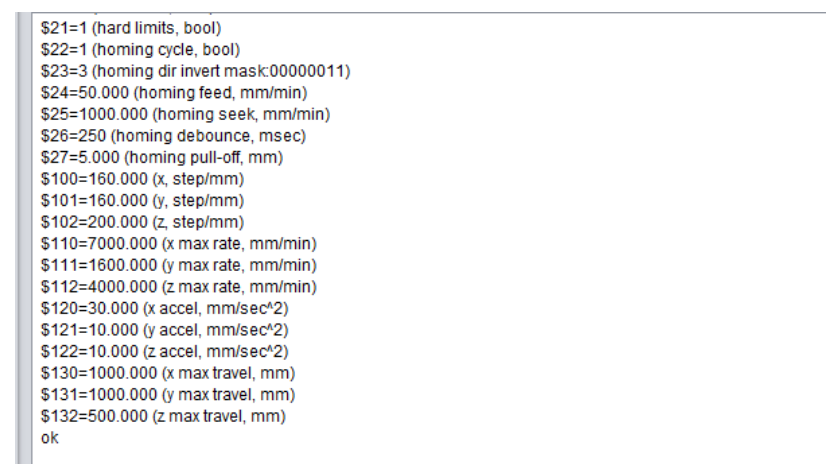


Figura 75. Parámetros de configuración GCode Sender

4.5. Implementación del Sistema de Visión Artificial

Como se puede observar en la figura 48, es necesario estructurar una serie de pasos para lograr implementar el sistema de visión artificial, dichos pasos se detallan en las siguientes secciones.

4.5.1. Adquisición de imágenes

Para realizar el análisis de imágenes y posteriormente aplicar los algoritmos de reconocimiento de medidas, es necesario realizar una captura de imagen a partir de la interfaz de usuario con el algoritmo que se muestra en la figura 76, debido a que es mejor aplicar algoritmos de detección de bordes, filtros y adquirir características relevantes en imágenes, que en video.

```
cap0 >> frame0;
cap1 >> frame1;
cap0.release();
cap1.release();
std::stringstream sstm1;
sstm1 << "C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\imagenes\\img"<<"F"<< ".png";
imwrite(sstm1.str(),frame0);

std::stringstream sstm2;
sstm2 << "C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\imagenes\\img"<<"L"<<"k ".png";
imwrite(sstm2.str(),frame1);
```

Figura 76. Algoritmos para adquisición de imágenes

Una vez que se captura la imagen a través de la interfaz de usuario que se detallará posteriormente, las mismas se guardarán en una dirección asignada que para el caso es "C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\imagenes\\...". Cabe recalcar que dichas imágenes tomarán el nombre de "imgF" e "imgL", que son las iniciales de "imagen Frontal" e "imagen Lateral". Además estas imágenes son temporales puesto que se sobrescribirán cada vez que el usuario decida tomar la foto o haya definido que la imagen se debe guardar.

Para el guardado de las imágenes se utiliza el siguiente comando:

- **Imwrite:** Permite guardar una imagen en un archivo especificado. Consta de tres parámetros que son: la ruta del archivo, el nombre de la imagen y el formato en el cual se va a guardar la imagen.

4.5.2. Pre-Procesamiento de imágenes

El pre-procesamiento de imágenes permitirá mediante algoritmos, mejorar la calidad de las imágenes capturadas:

- **Escala de grises:** Para el tratamiento de las imágenes capturadas es necesario convertir a escala de grises utilizando el siguiente código (Ver figura 77):

```
src=imread("C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\imagenes\\imgF.png",1);
/// Convert image to gray and blur it
cvtColor(src, src_gray, CV_BGR2GRAY );
```

Figura 77. Algoritmo de conversión a escala de grises

- **Eta de filtrado:** Para la parte del filtrado se utilizaron los siguientes comandos de programación: BLUR; permite una etapa de suavizado en la imagen, además de eliminar el ruido también se suavizan los bordes. THRESHOLD; Dependiendo de la iluminación de la sección de visión artificial, se establece un valor de THRESHOLD que para nuestro caso mediante pruebas se determinó en un valor constante de 150, pero dicho valor no es válido para piezas de color oscuro.
- **Dilatación:** Este comando permite aumentar el tamaño de los bordes, haciendo así más fácil la detección, los resultados se muestran en la figura 78:



Figura 78. Proceso de dilatación de imágenes (imagen sin dilatación/ imagen con dilatación)

Fuente: (OpenCV, 2014)

4.5.3. Encontrar Contornos

En esta etapa se utilizó el comando “findContours” ver figura 79, el cual permitió determinar contornos de una figura, para posteriormente realizar un cuadro delimitador alrededor de la misma:

```
/// Find contours
findContours(threshold_output, contours, hierarchy, CV_RETR_TREE, CV_CHAIN_APPROX_SIMPLE, Point(0, 0) );
```

Figura 79. Algoritmo para encontrar contornos en una imagen

El resultado del comando “findContours” se muestra en la figura 80.

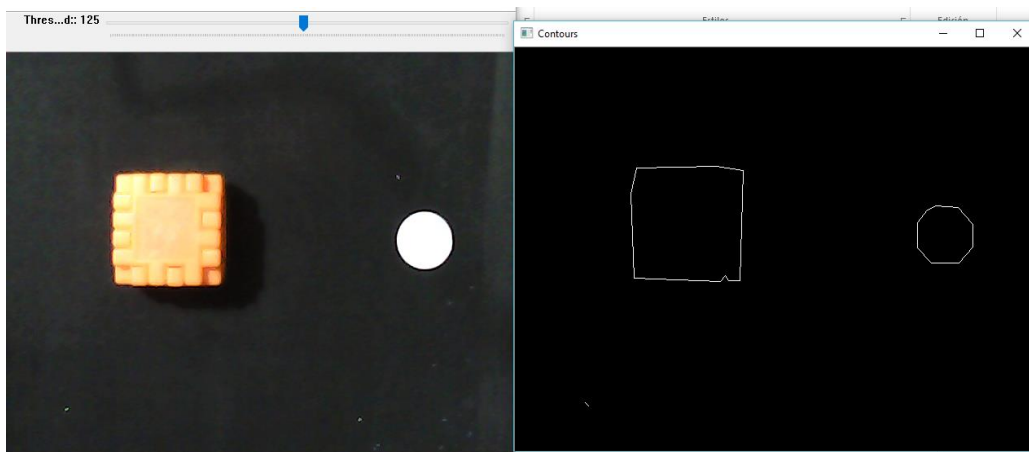


Figura 80. Resultado de encontrar contornos en una imagen

4.5.3.1. Eliminación de contornos producidos por ruido

Es necesario eliminar contornos que no son lo suficientemente considerables como se muestra en la figura 82, ya que estos representan ruido en la imagen y por ende fallos en la visión, el algoritmo utilizado se muestra en la figura 81:

```
if(contourArea(contours[i])>600)
```

Figura 81. Algoritmo para delimitación de contornos

La línea de programación descrita en la figura 80, limita a los contornos mediante el área detectada, es decir si el área es menor que 600 pixeles simplemente no se toma en cuenta, y es considerado como ruido.

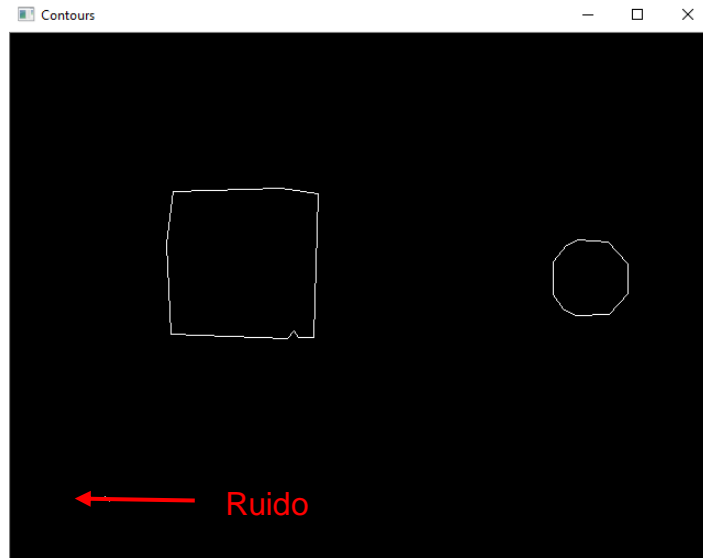


Figura 82. Representación de contornos despreciables

Los resultados de aplicar este algoritmo de programación se muestran en la figura 83:

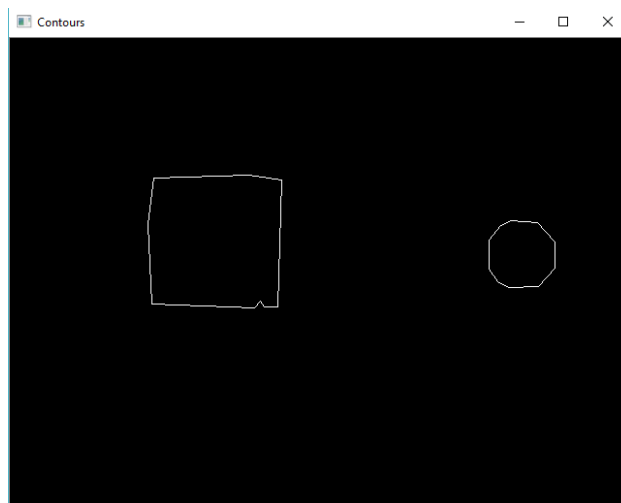


Figura 83. Imagen sin ruido

4.5.4. Creación de un cuadro Delimitador

Para realizar la medición de las figuras encontradas, primero se dibujará un cuadro delimitador alrededor de las mismas para poder determinar las dimensiones de figuras irregulares. El cuadro delimitador encerrará el área mínima de cualquier forma, como se muestra en la figura 84. El algoritmo utilizado es:

“rectangle(drawing,boundRect[i].tl(),boundRect[i].br(),Scalar(255,0,255),2,8,0);”.

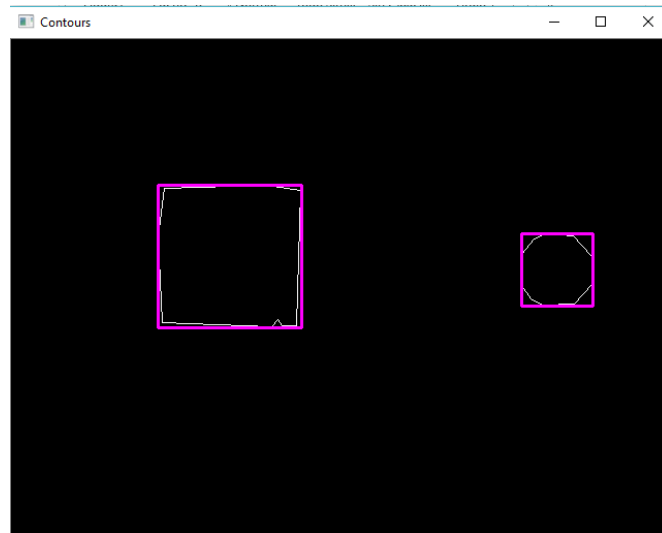


Figura 84. Cuadro delimitador alrededor de contornos encontrados

4.5.5. Ordenamiento de contornos

Debido a que se realizará procesamiento de imágenes en 2D, es necesario tener una referencia fija con dimensiones conocidas, lo cual servirá de base para determinar dimensiones de otras figuras. Para el ordenamiento se utilizará el comando “SORT”, cuya estructura se muestra en la figura 85.

```
sort(contours.begin(), contours.end(), Right_Left_contour_sorter());
```

Figura 85. Estructura del comando SORT

- El parámetro “Right_Left_contour_sorter()” es una función creada con las características de ordenamiento deseados, lo cual se muestra en la figura 86. Como se puede observar, el ordenamiento será de derecha a izquierda eso quiere decir que la referencia siempre debe estar a la derecha del campo de visión principal:

```

struct Right_Left_contour_sorter // 'less' for contours
{
    bool operator ()( const vector<Point>& a, const vector<Point> & b )
    {
        Rect ra(boundingRect(a));
        Rect rb(boundingRect(b));
        return (ra.x > rb.x);
    }
};

```

Figura 86. Algoritmo de ordenamiento de contornos

4.5.6. Establecer dimensiones en cantidad de pixeles

Una vez que se tiene el cuadro delimitador, se estableció la cantidad de pixeles que existe en el ancho y en el alto de las figuras detectadas, cabe recalcar que no se va a controlar el giro de las piezas a guardar, es decir el cuadro delimitador se dibujará independientemente del ángulo en el que se coloque la pieza a ser guardada. Para determinar la cantidad de pixeles en ancho y altura se utilizará las funciones “width” y “height” respectivamente. Los comandos de programación utilizados son los que se muestran en la figura 87:

```

double res = boundRect[i].width;
double res1 = boundRect[i].height;

```

Figura 87. Determinación de pixeles de una figura

Como se observa en la figura 87 los valores de ancho y altura en pixeles se asignan a las variables *res* y *res1* respectivamente.

4.5.7. Comparación de pixeles con la referencia

Para la comparación y determinación de dimensiones mediante cantidad de pixeles existentes en la figura deseada, es necesario conocer las dimensiones reales de la referencia, para este caso el diámetro de la referencia es de 24.2mm, por lo tanto dicho valor mediante el cuadro delimitador es el mismo tanto para el ancho como para la altura. Como se mencionó anteriormente, la figura de referencia debe situarse siempre a la derecha como se muestra en la figura 88.

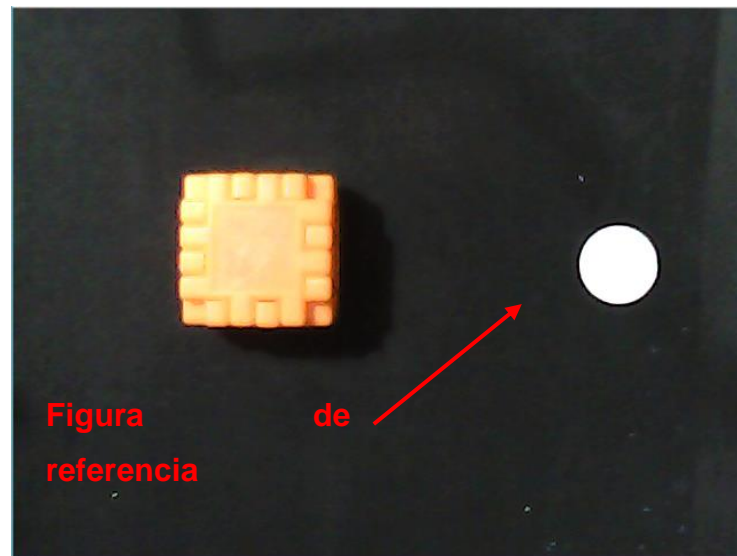


Figura 88. Ubicación de la figura de referencia

4.5.8. Cálculos matemáticos para el escalado en la medición

Una vez establecidos los parámetros de la referencia, se utilizaron artificios matemáticos sencillos para establecer las dimensiones reales de la figura, las ecuaciones utilizadas fueron Ec.22-23:

$$ancho = \frac{ancho \times 24.2}{ancho \text{ de la referencia}} \quad \text{Ec. 22}$$

Debido al ordenamiento de los contornos, simplemente para el ancho de la referencia, se tomó en cuenta el primer contorno encontrado, mediante el algoritmo mostrado en la figura 88.

```
if (i==0){
    resp=res;
}
```

Figura 89. Algoritmo para seleccionar el primer contorno

En donde: **resp** representa el ancho de la referencia y **res** el ancho real de la pieza deseada.

Para determinar la altura se utilizó la Ec.23:

$$altura = \frac{altura \times 26.5}{altura \text{ de la referencia}}$$

Ec. 23

4.5.9. Impresión de resultados

Ya realizados los pasos para determinar dimensiones en 2D, únicamente queda mostrar los resultados obtenidos para lo cual se utilizó el código mostrado en la figura 90:

```
ui->lblX->setText(QString::fromStdString(lblXstr.str()));
ui->lblY->setText(QString::fromStdString(lblYstr.str()));
```

Figura 90. Algoritmos para mostrar las dimensiones de la figura

Los resultados de todo el proceso de visión artificial se muestran en la figura 91:



Figura 91. Resultado del proceso de visión artificial

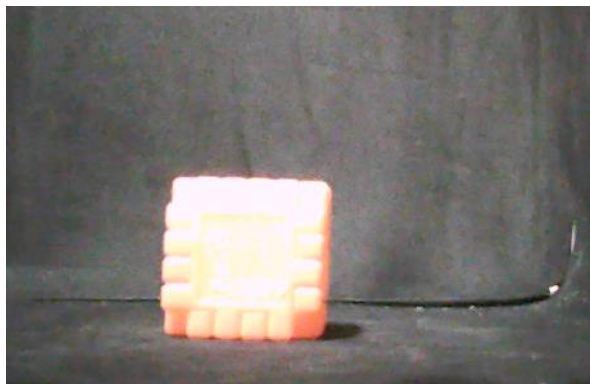
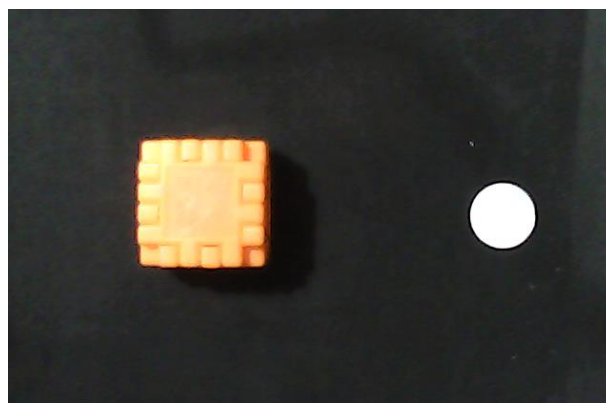
4.6. Comparación de dimensiones para el almacenamiento de figuras.

Para la comparación de dimensiones, primero es necesario conocer las máximas medidas que se puede almacenar en cada espacio, considerando el tamaño de los pallets, y el espacio que debe existir para que el robot deposite o retire las piezas. De acuerdo al diseño de almacenadores de la sección 3.1.1 la distribución de tamaños es 1, 2, 3, 4 siendo 1 la medida más grande y 4 la más pequeña, dichas medidas se muestran en la tabla 23.

Tabla 23*Dimensiones de los espacios de almacenamiento*

Espacio	Ancho	Altura	Profundidad
1	170mm	190mm	180mm
2	120mm	120mm	180mm
3	100mm	100mm	180mm
4	45mm	70mm	180mm

Como se puede observar en la tabla 23, se necesita de tres medidas para la comparación, ancho, alto y profundidad, por lo cual se utilizó dos cámaras: una cámara proporcionará las medidas de ancho y alto, y la otra la medida de profundidad. Las imágenes capturadas muestran como en las figuras 92 y 93 respectivamente.

**Figura 92.** Captura frontal**Figura 93.** Captura superior

4.6.1. Algoritmos de programación para la comparación de dimensiones.

Las dimensiones mencionadas en la tabla 23 deben ser introducidas en el programa, para lo cual se utilizaron los algoritmos de programación que se muestran en la figura 94:

```
//Definimos medidas almacenadores
//Almacenadores fila 1
static const int alm1h=190;
static const int alm1p=180;
static const int alm1c=170;
//Almacenadores fila 2
static const int alm2h=120;
static const int alm2p=180;
static const int alm2c=120;
//Almacenadores fila 3-4
static const int alm34h=100;
static const int alm34p=180;
static const int alm34c=100;
//Almacenadores fila 5
static const int alm5h=70;
static const int alm5p=180;
static const int alm5c=45;
```

Figura 94. Medidas de almacenadores en Qt Creator

Posteriormente se realizó la comparación de las medidas de los almacenadores, con las medidas obtenidas mediante visión artificial, de las diferentes formas a almacenar, como se muestra en la figura 95, con lo cual se define el lugar de almacenamiento.

```
int guardar::comparar(double temp, double temp1, double temp0)
{
    QMessageBox msg;
    msg.setText(QString::number(temp));
    msg.exec();/**/
    int tipo = 0;
    if(temp<alm5c && temp1<alm5h && temp0<180){
        tipo = 4;
        return tipo;
    }else if(temp<alm34c && temp1<alm34h && temp0<180){
        tipo = 3;
        return tipo;}
    }else if(temp<alm2c && temp1<alm2h && temp0<180){
        tipo = 2;
        return tipo;
    }else if(temp<alm1c && temp1<alm1h && temp0<180){
        tipo = 1;
        return tipo;
    }
    return tipo;
}
```

Figura 95. Algoritmos de comparación de medidas

4.7. Implementación de algoritmos de programación para el funcionamiento del mecanismo S/R.

Primero hay que tener en cuenta los pasos necesarios para realizar el guardado y recuperación de las diferentes figuras, para un mejor entendimiento en la figura 96, se muestra un diagrama de flujo con el funcionamiento general de todo el sistema.

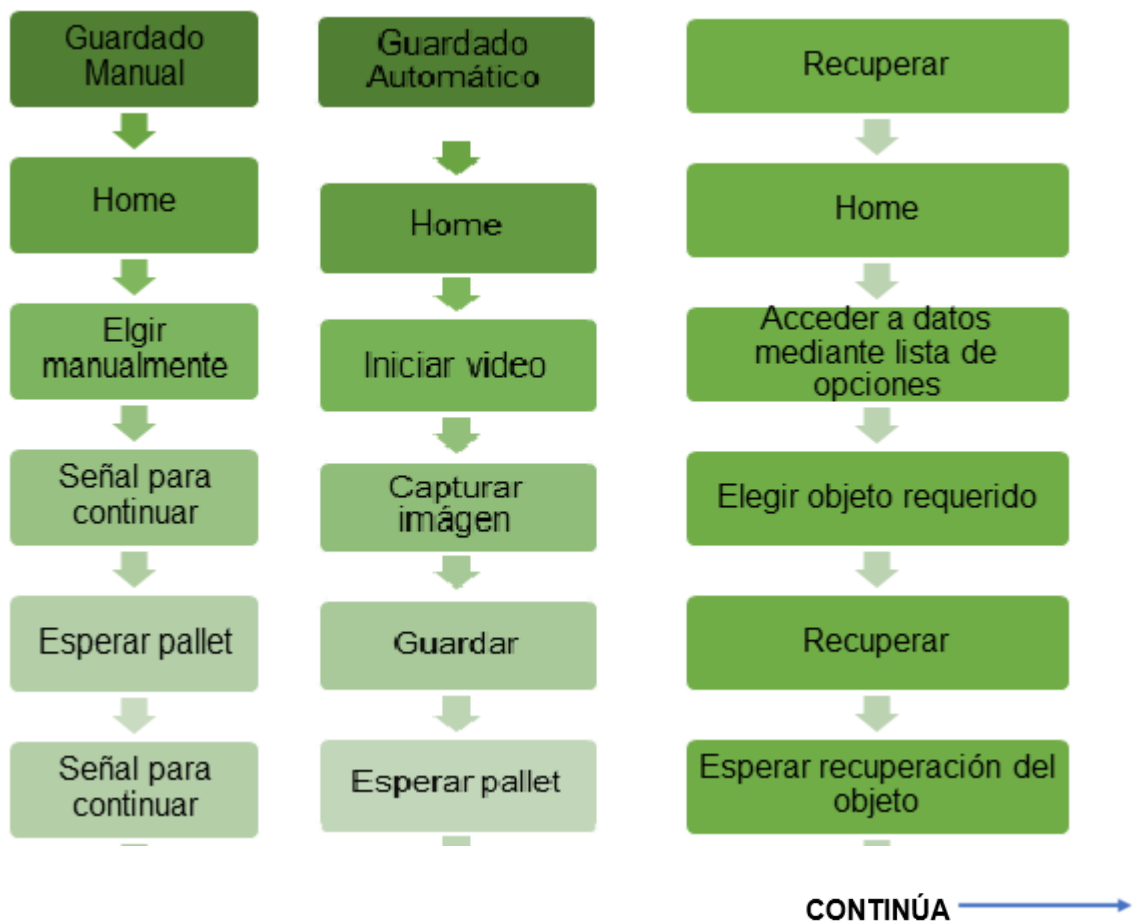




Figura 96. Diagrama de flujo del funcionamiento general del AS/RS

Una vez establecido el funcionamiento general de todo el sistema, resulta necesario la implementación de una interfaz gráfica.

4.8. Implementación de lenguaje de programación G

Es conveniente realizar la rutina que va a realizar el mecanismo tanto para el guardado como para la recuperación, en las figuras 97 y 98, se detallan dichas rutinas respectivamente:

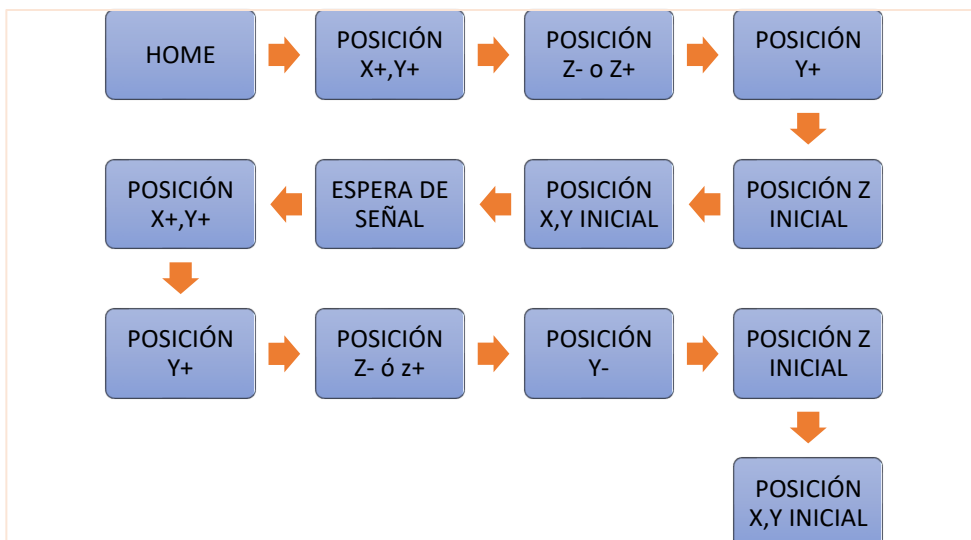


Figura 97. Rutina para el almacenamiento

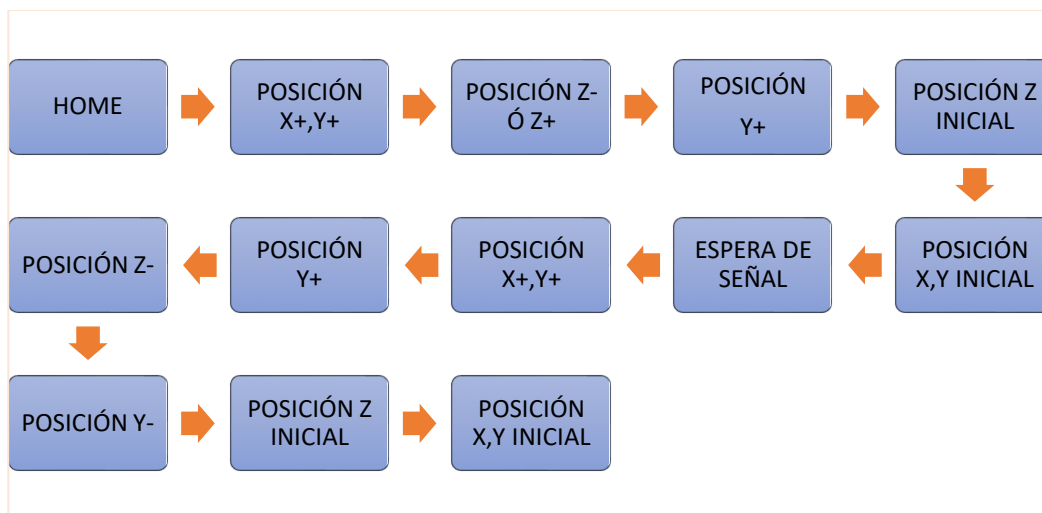


Figura 98. Rutina para la recuperación

Una vez que se tiene claro las rutinas de almacenamiento y recuperación, se establecen los comandos de programación G, los cuales posteriormente serán introducidos en lenguaje C++ en su compilador Qt creator para complementar con la visión artificial. Los comandos de programación G se muestran en la tabla 24.

Tabla 24

Comandos G para realizar la rutina de almacenamiento

COMANDO	DESCRIPCIÓN
\$X	Desbloqueo del mecanismo
\$H	Envío a home(posición de referencia)
G10 P0 L20 X0 Y0 Z0	Inicializa las coordenadas en 0
G90 X268 Y21	Traslado en coordenadas absolutas a una posición X,Y
G91 Z-235	Traslado en coordenadas relativas a una posición Z

CONTINÚA 

G91 Y10	Traslado en coordenadas relativas a una posición Y+
G91 Z235	Posición inicial de Z
G90 X0 Y0	Posición inicial de X,Y mediante coordenadas absolutas
(Espera de señal cuando se deposite una pieza)	
G90 X268 Y21	Traslado en coordenadas absolutas a una posición X,Y
G91 Y10	Traslado en coordenadas relativas a una posición Y+
G91 Z-235	Traslado en coordenadas relativas a una posición Z-
G91 Y-10	Traslado en coordenadas relativas a una posición Y-
G91 Z235	Posición inicial de Z
G90 X0 Y0	Posición inicial de X,Y mediante coordenadas absolutas
FIN DEL PROCESO	

Como se puede observar en las rutinas realizadas en las figuras 97 y 98 respectivamente, el proceso de guardado y de recuperación son similares, por lo tanto en la programación no existe mayor variación.

Además se determinó que durante el proceso, solo existe variación en las coordenadas X, Y, debido al uso de coordenadas relativas en ciertos puntos, esto

facilita circunstancialmente la programación, ya que se puede crear una función que contenga las coordenadas X, Y, de cada pallet, y otra función que contenga las acciones restantes.

4.9. Algoritmos de comunicación y traspaso de comandos G a lenguaje C++

4.9.1. Configuración para la comunicación serial C++ con Arduino

La comunicación del programa elaborado en C++ con Arduino será de forma serial, por lo tanto es necesario configurar algunos parámetros los cuales se muestran en la figura 99.

```

if(arduino_is_available){
    // open and configure the serialport
    arduino->setPortName(arduino_port_name);
    if(!arduino->open(QSerialPort::WriteOnly)){
        timer = new QTimer;
        timer->setSingleShot(true);
        connect(timer, SIGNAL(timeout()), this, SLOT(cerrar()));
        timer->start(1500);
    }
    arduino->setBaudRate(QSerialPort::Baud115200);
    arduino->setDataBits(QSerialPort::Data8);
    arduino->setParity(QSerialPort::NoParity);
    arduino->setStopBits(QSerialPort::OneStop);
    arduino->setFlowControl(QSerialPort::NoFlowControl);
}else{
    // give error message if not available
    QMessageBox::warning(this, "Port error", "Couldn't find the Arduino!");
    timer = new QTimer;
    timer->setSingleShot(true);
    connect(timer, SIGNAL(timeout()), this, SLOT(cerrar()));
    timer->start(1500);
}

```

Figura 99. Parámetros de comunicación de Qt Creator con Arduino

4.9.2. Traspaso de códigos G a lenguaje C++

Como se definió que las coordenadas X, Y de cada pallet son las que van a variar en cada rutina, se guarda dichas coordenadas en una función aparte. Para obtener las coordenadas se utilizó el software libre “UniversalGcodeSender”, se obtiene cada una de las coordenadas de los pallets, como se muestra en la figura 100.

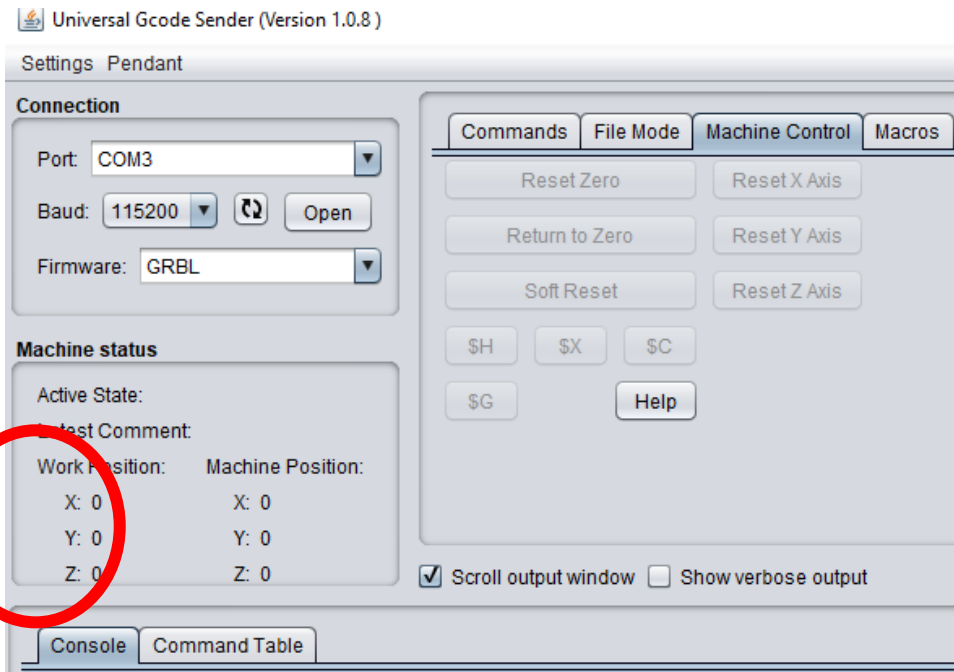


Figura 100. Obtención de coordenadas de almacenamiento

Posteriormente en Qt Creator se crea una función denominada “guardar”, y se digita los valores de cada coordenada de X, Y, tanto para el estante A como para el estante B como se muestra en la figura 101.

```
void guardar::desicionA(int i)
{
    switch(i){
        case 1:
            arduino->write("G90 X268 Y21");
            break;
    }
}
```

Figura 101. Valores de las coordenadas X, Y

4.9.3. Creación de las rutinas de almacenamiento y recuperación en C++

Como se mencionó anteriormente, primero se debe enviar a HOME (posición inicial) al mecanismo para lograr obtener las coordenadas de referencia X0, Y0, Z0, para realizar dicha acción se utiliza los códigos mostrados en la figura 102.

```

void guardar::on_pushButton_clicked()
{
    if(arduino->isWritable()){
        arduino->write("$H");
        arduino->write("\x0A");
        arduino->write("\x0D");
        arduino->write("G10 P0 L20 X0 Y0 Z0");
        arduino->write("\x0A");
        arduino->write("\x0D");
    }else{
        qDebug() << "Couldn't write to serial!";
    }
}
}

```

Figura 102. Algoritmos para enviar a HOME al AS/RS

De acuerdo a la figura 97, el siguiente paso de la rutina después de la coordenada X, Y, es ingresar el porta pallets, elevarlo, posteriormente retirarlo y enviarlo a la posición inicial, por lo que el algoritmo quedaría de la siguiente forma (ver figura 103).

```

if(posicionGuardado[0]==1){
    decisionA(posicionGuardado[1]);
    arduino->write("G91 Z-235");
}
else if(posicionGuardado[0]==2){
    decisionB(posicionGuardado[1]);
    arduino->write("G91 Z235");
}
arduino->write("\x0A");
arduino->write("\x0D");
arduino->write("G91 Y10");
arduino->write("\x0A");
arduino->write("\x0D");
if(posicionGuardado[0]==1){
    arduino->write("G91 Z235");
}

```

Figura 103. Algoritmo de rutina del porta pallet

Finalmente se mostrará un mensaje “clic para continuar” cuando ya se haya depositado la pieza en el pallet, por lo tanto los siguientes pasos de la rutina después de haber enviado a la coordenada X, Y son: elevar el porta pallet, ingresar al espacio del almacén, descender, retirar el porta pallet y regresar a la posición de origen, el algoritmo implementado para dicha rutina se muestra en la figura 104.

```

QMessageBox msgb;
msgb.setText("Click para continuar");
msgb.exec();
if(arduino->isWritable()){
    if(posicionGuardado[0]==1){
        decisionA(posicionGuardado[1]);
    }else if(posicionGuardado[0]==2){
        decisionB(posicionGuardado[1]);
    }
    arduino->write("G91 Y10");
    arduino->write("\x0A");
    arduino->write("\x0D");
    if(posicionGuardado[0]==1){
        arduino->write("G91 Z-235");
    }else if(posicionGuardado[0]==2){
        arduino->write("G91 Z235");
    }
    arduino->write("\x0A");
    arduino->write("\x0D");
    arduino->write("G91 Y-10");
    arduino->write("\x0A");
    arduino->write("\x0D");
    if(posicionGuardado[0]==1){
        arduino->write("G91 Z235");
    }else if(posicionGuardado[0]==2){
        arduino->write("G91 Z-235");
    }
    arduino->write("\x0A");
    arduino->write("\x0D");
    arduino->write("G90 X0 Y0");
    arduino->write("\x0A");
    arduino->write("\x0D");
}
}

```

Figura 104. Rutina final para el almacenamiento

4.10. Implementación del sistema de registro de datos

El sistema de registro de datos es indispensable en el AS/RS, puesto a que esto permitirá conocer que piezas se encuentran almacenadas en el mismo. Para implementar la base de datos se utilizará lenguaje C++ mediante el compilador Qt Creator. Este software facilita la creación de una base de datos ya que a través del comando **"imwrite"** permite guardar archivos en un directorio previamente especificado.

Antes de guardar cualquier archivo se debe realizar un barrido por el directorio, esto con el fin de evitar sobrescribir los archivos ya existentes cada vez que se inicie la máquina, para realizar el barrido de los archivos se utilizó los siguientes algoritmos de programación (ver figura 105). Mediante **"QStringList lista = QDir("C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\prueba").entryList();"** accedemos al directorio, y con un ciclo repetitivo, se recorre cada archivo existente.

```

void guardar::sver()
{
    for(int ceroA=0;ceroA<=32;ceroA++){
        almacenadorA[ceroA]=0;
    }
    for(int ceroB=0;ceroB<=32;ceroB++){
        almacenadorB[ceroB]=0;
    }
    QStringList lista = QDir("C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\prueba").entryList();
    for (int ia=2; ia<lista.size(); ia++){
        for(int j=1;j<3;j++){
            for(int i=1;i<=32;i++){
                std::stringstream ss;
                ss << "img" << j << i << ".png";

                if(ss.str().compare(lista.at(ia).toStdString()) == 0){

                    if(j==1){
                        almacenadorA[i]=1;
                    }else if(j==2){
                        almacenadorB[i]=1;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

Figura 105. Algoritmo para el barrido de reconocimiento de imágenes existentes

Una vez que se reconoció las imágenes que ya se almacenaron, se puede seguir almacenando en el directorio de la base de datos, las respectivas capturas de acuerdo a como se vayan guardando las piezas en el almacén. Cada pieza va a tener dos capturas, una frontal y una superior. La denominación de cada una será:

- “img11F” significa que es la imagen número 1, está guardada en el almacén 1 y es superior.
- “img11L” significa que es la imagen número 1, está guardada en el almacén 1 y es frontal.

Los algoritmos utilizados para el almacenamiento de las imágenes se pueden observar en la imagen 106.

```

std::stringstream sstm1;
sstm1 << "C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\prueba\\img"<<posicionGuardado[0]<<posicionGuardado[1]<<"F.png";
imwrite(sstm1.str(),frame0);

std::stringstream sstm2;
sstm2 << "C:\\ARCHIVOSQT\\SerialPort\\prueba\\img"<<posicionGuardado[0]<<posicionGuardado[1]<<"L.png";
imwrite(sstm2.str(),frame1);

```

Figura 106. Algoritmos para almacenar imágenes en la base de datos

Finalmente se puede acceder al directorio en el cual van a estar almacenadas todas las imágenes (Ver figura 107).

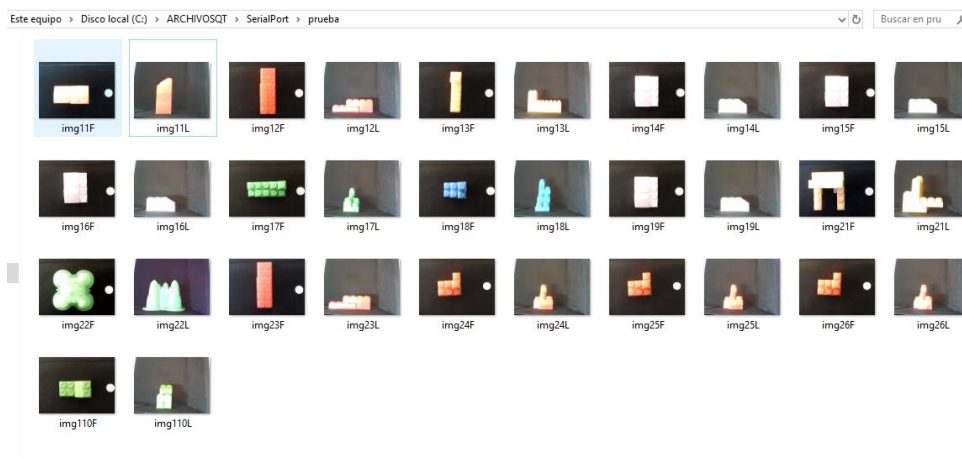


Figura 107. Directorio con las imágenes almacenadas

Como ejemplo para observar el almacenamiento de la base de datos, se va a tomar una pieza al azar.

La captura frontal se puede observar en la figura 108.



Figura 108. Captura frontal almacenada en la base de datos

La captura superior se puede observar en la figura 109.



Figura 109. Captura superior almacenada en la base de datos

4.11. Creación de la Interfaz Gráfica HMI

Para la creación de la interfaz gráfica se utilizó el software Qt Creator, ya que posee librerías que facilitan la creación de la misma. La interfaz gráfica está conformada por una ventana principal (ver figura 110) y dos ventanas secundarias (ver figuras 111 y 112) respectivamente.



Figura 110. Ventana principal de la interfaz gráfica

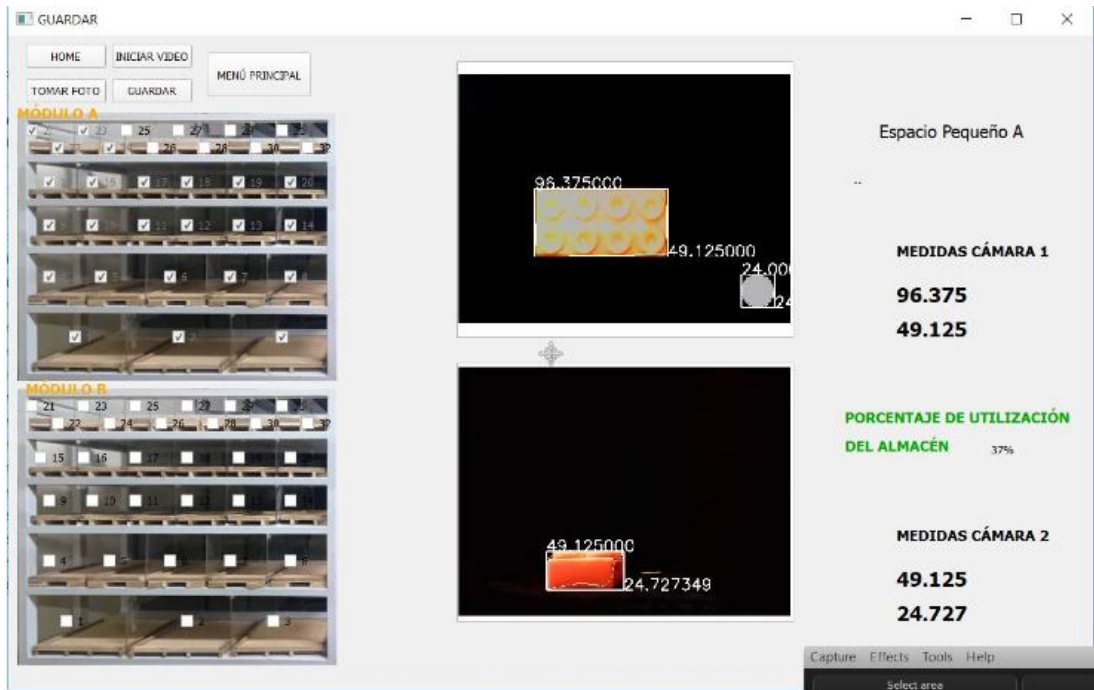


Figura 111. Ventana secundaria del HMI (almacenamiento)

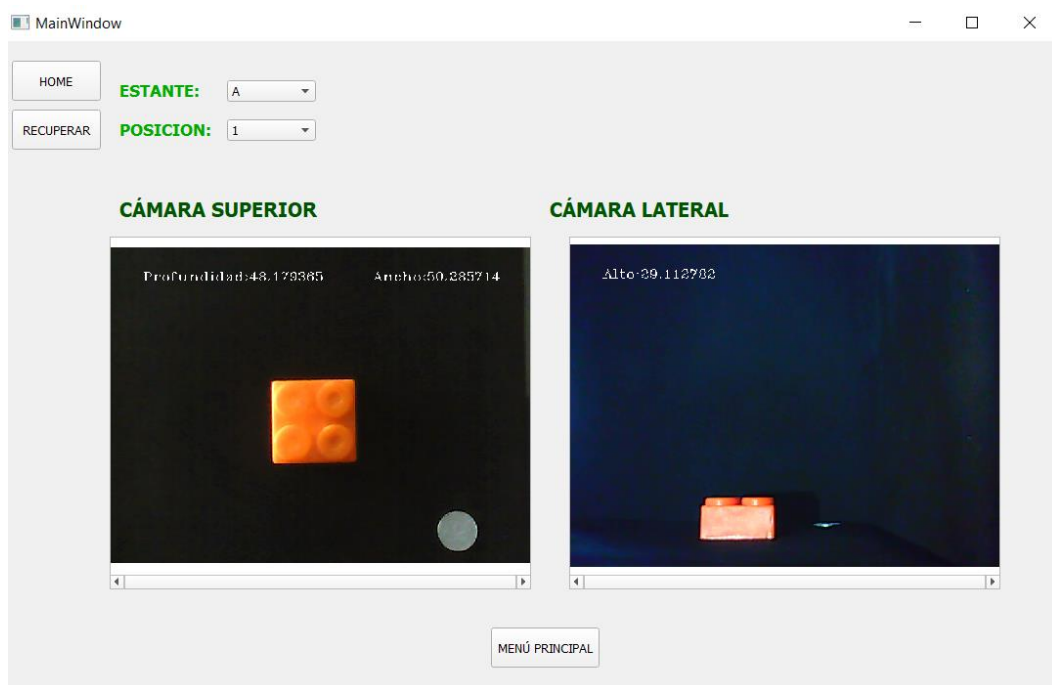


Figura 112. Ventana secundaria del HMI (recuperación)

En la figura 110 se puede observar la ventana principal, en la cual se encuentran dos botones, cuya finalidad se detalla a continuación.

- **GUARDAR.-** Al presionar el botón “GUARDAR” se abrirá una ventana secundaria con las opciones que nos da la máquina para realizar el guardado de piezas.
- **RECUPERAR.-** Al presionar el botón “RECUPERAR” se abrirá una ventana secundaria con las opciones que nos da la máquina para realizar la recuperación de piezas.

La ventana secundaria “GUARDAR”, la cual se observa en la figura 111, contiene varios botones con diferentes funciones que se detallarán a continuación:

- **HOME.-** Este botón permite enviar a la máquina al punto de referencia inicial y encerar las coordenadas X, Y, Z. Cabe recalcar que dicho botón se encuentra al principio ya que es el primer paso que se debe realizar para el funcionamiento de la máquina.
- **TOMAR FOTO.-** Esta opción permite capturar las imágenes de la pieza que se desea almacenar, como se muestra en la figura 113.

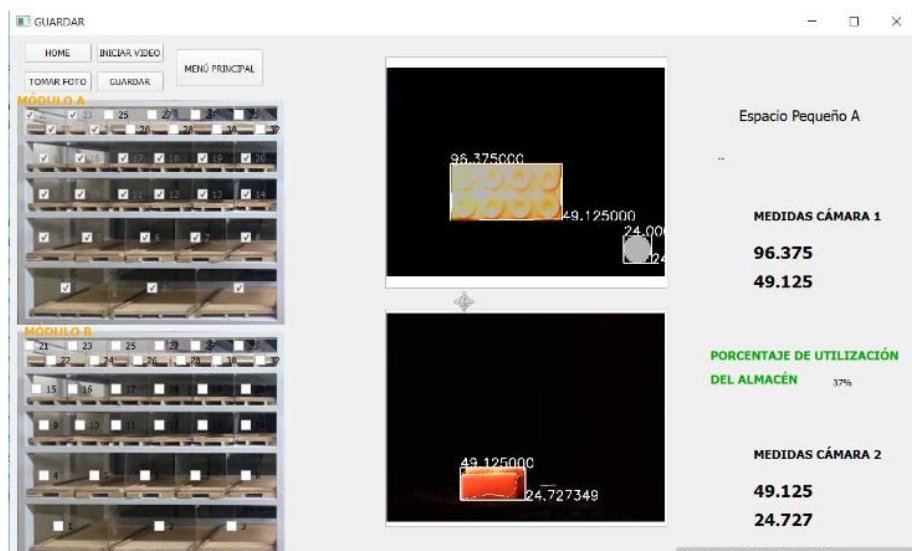


Figura 113. Pantalla con las imágenes de la pieza a almacenar

- **GUARDAR.-** Una vez que se haya realizado la captura de las imágenes de la pieza y se considere que las medidas de la misma son adecuadas, el botón “GUARDAR” permitirá inicializar las rutinas de almacenamiento. En este lapso aparecerá una ventana emergente.

- **INICIAR VIDEO.-** Esta opción permite inicializar el video, cuando al capturar una imagen, se considere que no es correcta, ya sea por errores de iluminación y contraste, o por el hecho de querer guardar piezas que excedan en dimensiones.
- **REGRESAR.-** Con esta opción se puede inicializar la ventana principal.

Además en esta ventana se puede visualizar la información del estante al que se va a almacenar, así como las dimensiones de la pieza, como se muestra en la figura 114.

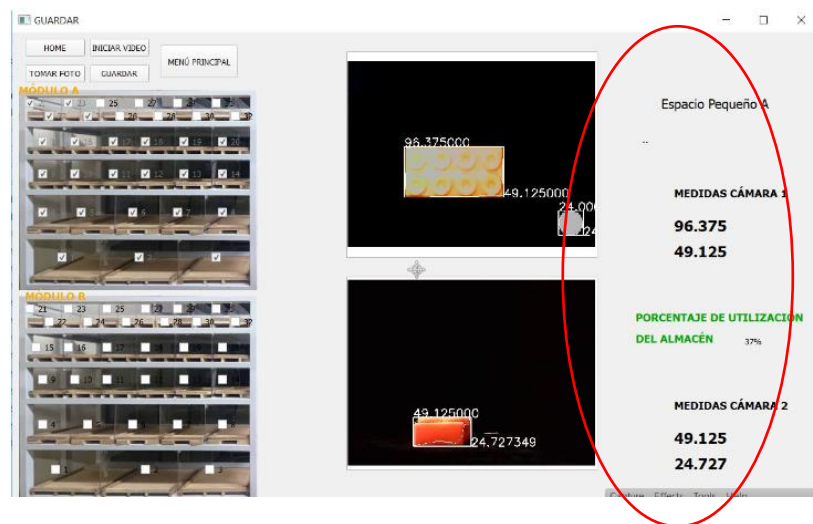


Figura 114. Información de la pieza a ser almacenada

La ventana secundaria “RECUPERAR”, la cual se observa en la figura 112, contiene varias opciones de botones con diferentes funciones que se detallan a continuación:

- **HOME.-** Al igual que en la opción de guardar, para poder RECUPERAR, es necesario enviar a la máquina al punto de referencia inicial y encerrar las coordenadas X, Y, Z.
- **ESTANTE.-** Esta opción permite escoger uno de los dos estantes disponibles (A, B), como se muestra en la figura 115 y recorrer de acuerdo a la posición las piezas almacenadas.



Figura 115. Elección del estante A o B

- **POSICIÓN.-** Se puede recorrer las diferentes posiciones de las piezas almacenadas, e ir visualizando en los cuadros inferiores las imágenes almacenadas en la base de datos. (Ver figura 116)

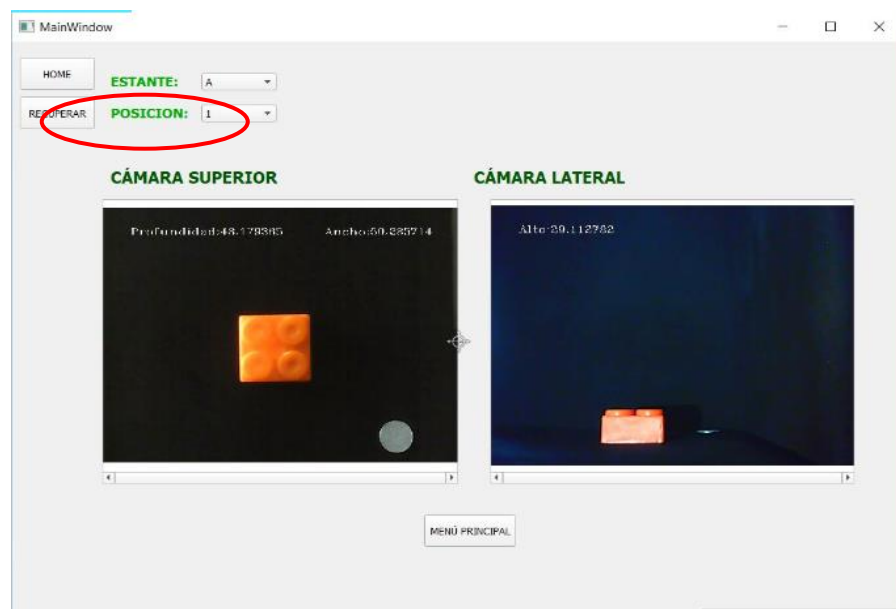


Figura 116. Elección de la posición de la pieza a recuperar

- **RECUPERAR.-** Cuando se haya escogido la pieza que se desea recuperar, esta opción hace que se empiece todas las rutinas para la recuperación, se inicia la rutina de recuperación.
- **REGRESAR.-** Con esta opción se puede inicializar la ventana principal.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

5.1. Pruebas y análisis de resultados del sistema

El sistema de visión artificial es de vital importancia en el proyecto, pues es el encargado de tomar las dimensiones de los objetos a guardar, para que el AS/RS sea capaz de reconocer las medidas adecuadas del módulo de almacenamiento donde debería guardarse el producto, optimizando espacios.

Por este motivo y al no existir pruebas normalizadas para validar la medición mediante visión artificial, se han realizado diferentes pruebas para validar el funcionamiento del sistema de visión artificial y determinar su índice de error.

5.1.1. Pruebas de medición de cubos regulares.

En primer lugar, se realizaron 10 pruebas de medición de objetos por visión artificial, usando iluminación natural, con cubos de color: naranja, amarillo, celeste, verde, rosado y morado, (figuras 117, 118, 119, 120, 121 y 122 respectivamente) con medidas de 50x50x50 [mm]. El objetivo de esta prueba es observar el índice de error de la medición para cada color, y determinar si es un error aceptable.

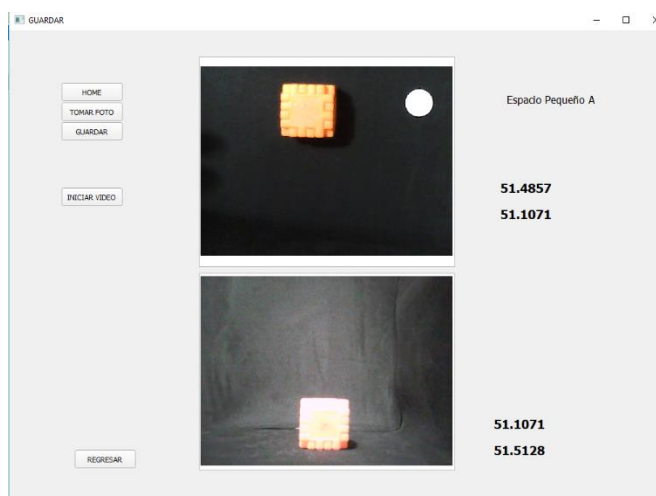
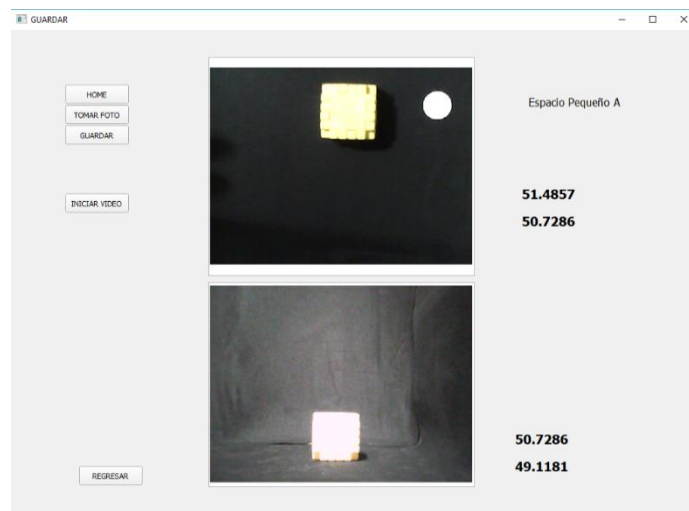


Figura 117. Cubo naranja

Tabla 25*Pruebas de medidas del cubo naranja*

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	51,11	51,88	51,49	-1,11	-1,88	-1,49
2	51,01	52,64	52,23	-1,01	-2,64	-2,23
3	50,7	52,63	51,85	-0,70	-2,63	-1,85
4	51,08	53,03	52,23	-1,08	-3,03	-2,23
5	51,08	52,63	52,23	-1,08	-2,63	-2,23
6	51,85	52,63	52,62	-1,85	-2,63	-2,62
7	51,08	52,64	52,23	-1,08	-2,64	-2,23
8	51,85	52,23	52,23	-1,85	-2,23	-2,23
9	51,08	53,44	52,23	-1,08	-3,44	-2,23
10	49,97	50,76	51,11	0,03	-0,76	-1,11
Promedio de Error				-1,08	-2,451	-2,04

**Figura 118.** Cubo amarillo**Tabla 26***Pruebas de medidas del cubo amarillo*

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	51,11	51,51	51,49	-1,11	-1,51	-1,49
2	50,73	49,12	51,49	-0,73	0,88	-1,49
3	51,11	48,31	51,49	-1,11	1,69	-1,49
4	51,49	49,05	51,49	-1,49	0,95	-1,49
5	51,11	48,29	51,49	-1,11	1,71	-1,49
6	51,11	52,81	51,11	-1,11	-2,81	-1,11
7	51,49	53,2	51,11	-1,49	-3,2	-1,11
8	49,97	50,86	51,48	0,03	-0,86	-1,48

CONTINÚA →

9	51,46	52,68	51,85	-1,46	-2,68	-1,85
10	51,46	53,09	51,85	-1,46	-3,09	-1,85
Promedio de Error				-1,10	-0,892	-1,49

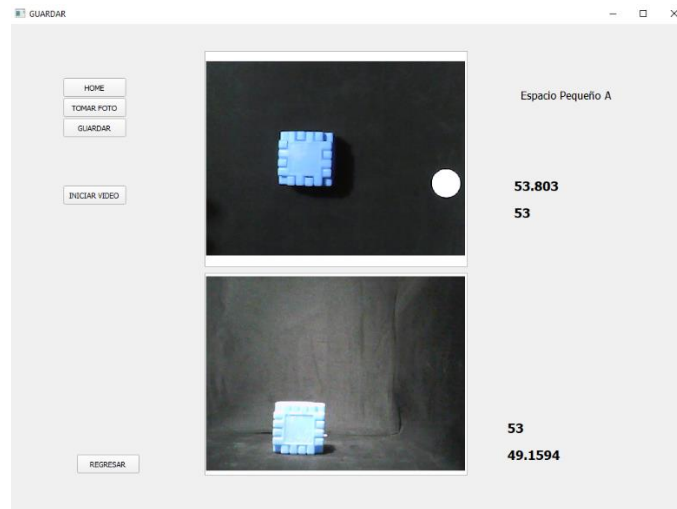


Figura 119. Cubo celeste

Tabla 27

Pruebas de medidas del cubo celeste

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	50,35	48,47	50,73	-0,35	1,53	-0,73
2	51,44	49,52	52,22	-1,44	0,48	-2,22
3	51,05	49,15	52,22	-1,05	0,85	-2,22
4	51,81	49,88	52,6	-1,81	0,12	-2,60
5	51,81	49,88	52,6	-1,81	0,12	-2,60
6	50,7	48,8	51,08	-0,70	1,2	-1,08
7	52,6	50,64	53,4	-2,60	-0,64	-3,40
8	49,59	47,74	50,35	0,41	2,26	-0,35
9	52,59	50,64	53,4	-2,59	-0,64	-3,40
10	52,21	50,26	52,6	-2,21	-0,26	-2,60
Promedio de Error				-1,42	0,502	-2,12

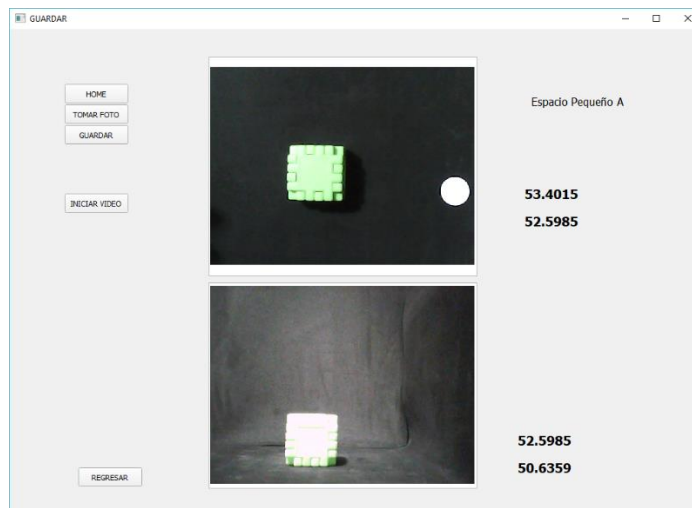


Figura 120. Cubo verde

Tabla 28

Pruebas de medidas del cubo verde

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	50,69	51,9	52,23	-0,69	-1,9	-2,23
2	50,73	50,73	50,73	-0,73	-0,73	-0,73
3	53	53	53,1	-3,00	-3	-3,10
4	53	53,1	53,1	-3,00	-3,1	-3,10
5	51,46	52,26	51,85	-1,46	-2,26	-1,85
6	51,08	52,23	51,46	-1,08	-2,23	-1,46
7	53	53	53,8	-3,00	-3	-3,80
8	53,8	55,49	53,8	-3,80	-5,49	-3,80
9	53,4	54,66	54,2	-3,40	-4,66	-4,20
10	51,07	52,68	51,84	-1,07	-2,68	-1,84
Promedio de Error				-2,12	-2,905	-2,61

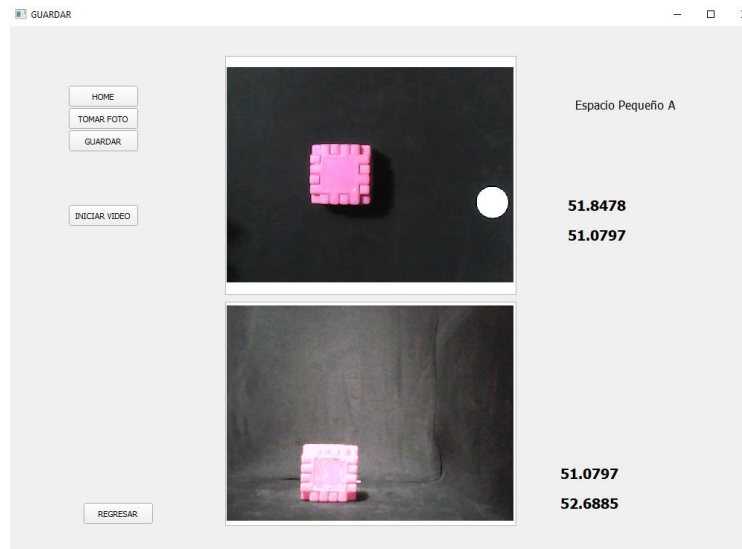


Figura 121. Cubo rosado

Tabla 29

Pruebas de visión del cubo rosado

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	50,31	47,33	51,08	-0,31	2,67	-1,08
2	52,21	49,11	52,6	-2,21	0,89	-2,60
3	51,44	48,75	51,83	-1,44	1,25	-1,83
4	53	49,86	53,4	-3,00	0,14	-3,40
5	53	50,66	53,4	-3,00	-0,66	-3,40
6	53	50,62	53,4	-3,00	-0,62	-3,40
7	53	50,62	53,4	-3,00	-0,62	-3,40
8	53	51,77	53	-3,00	-1,77	-3,00
9	51,83	51,42	51,44	-1,83	-1,42	-1,44
10	49,97	48,8	49,97	0,03	1,2	0,03
Promedio de Error				-2,08	0,106	-2,35

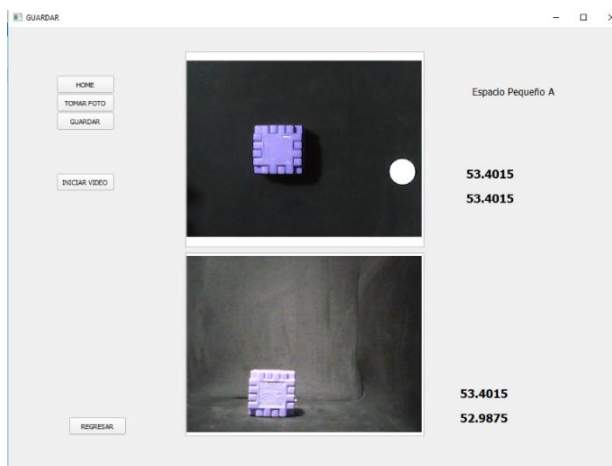


Figura 122. Cubo morado

Tabla 30

Pruebas de visión del cubo morado

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	53,00	52,5	53,00	-3,00	-2,50	-3,00
2	52,19	50,97	52,59	-2,19	-0,97	-2,59
3	51,02	50,62	51,41	-1,02	-0,62	-1,41
4	49,92	49,53	50,31	0,08	0,47	-0,31
5	49,54	48,01	49,92	0,46	1,99	0,08
6	49,92	49,53	49,51	0,08	0,47	0,49
7	50,66	50,26	51,05	-0,66	-0,26	-1,05
8	49,92	49,53	49,92	0,08	0,47	0,08
9	49,92	49,53	50,31	0,08	0,47	-0,31
10	51,02	50,62	51,41	-1,02	-0,62	-1,41
Promedio de Error				-0,71	-0,11	-0,94

Como se observa en las tablas 25, 26, 27, 28, 29 y 30 respectivamente, el valor máximo de error es de -2,905 [mm] en Y del cubo verde, es decir la medición arrojó un valor promedio de error de 2,905 [mm] más grande de la medida real; pues el valor de error se calcula al restar la medición de la medida real del cubo.

A continuación, en las figuras 123, 124 y 125, se muestran gráficas de barra del promedio de error en cada eje de medida de los cubos:

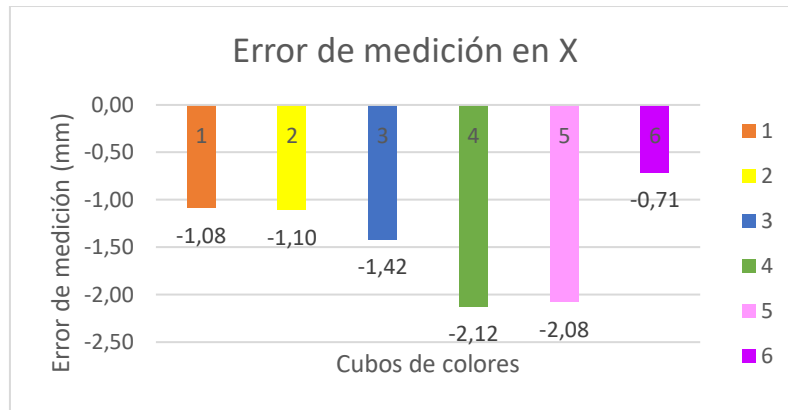


Figura 123. Gráfico de errores en X (Unidad: mm)

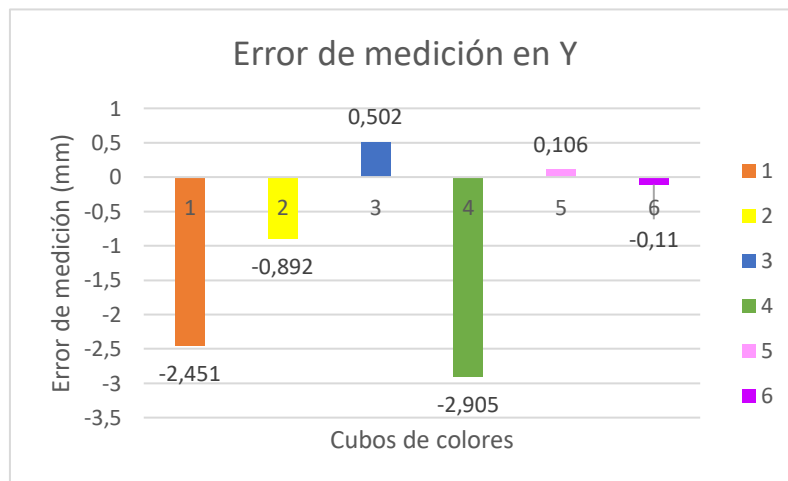


Figura 124. Gráfico de errores en Y (Unidad: mm)

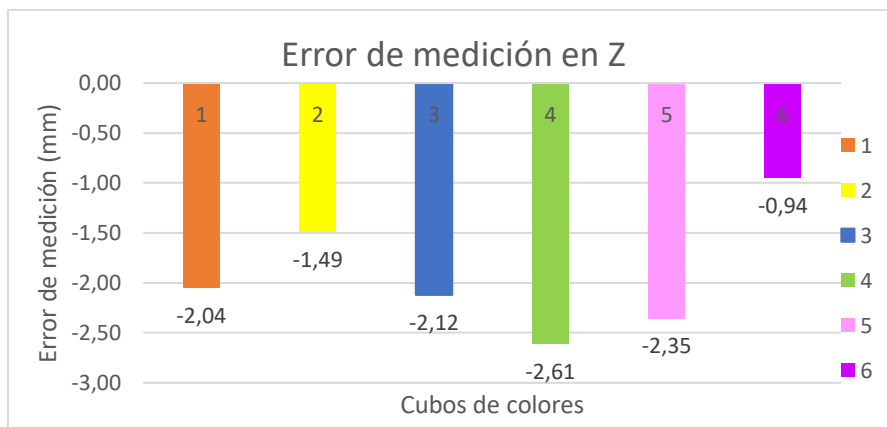


Figura 125. Gráfico de errores en Z (Unidad: mm)

Al interpretar las gráficas se observa que la medición que presenta el mayor promedio de error en las tres medidas es la del cubo color verde, esto se debe a la iluminación natural y el valor de contraste preestablecido del programa de visión artificial, pero como se mencionaba anteriormente el error es mínimo y simplemente se agregará un factor de compensación en la etapa de reconocimiento de módulo.

De igual manera se observa que los promedios de medición en Y presentan el promedio más alto, esto se debe a que el algoritmo toma como referencia la primera medida (medida de X y Z) para realizar el escalado y determinar la medida en Y por lo tanto existirá un error acumulado, el cual en ninguno de los casos es exagerado y se acepta.

Para la siguiente prueba se han tomado cubos regulares con medida: 50x100x50 [mm] (Ver figura 126) y 50x150x50 [mm] (Ver figura 127) como casos críticos.

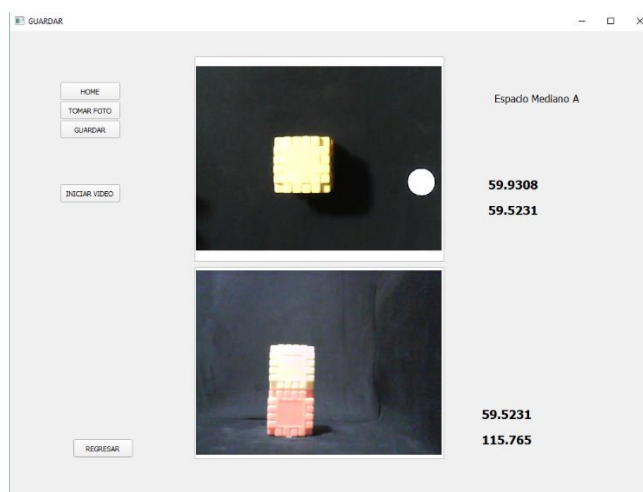


Figura 126. Cubo regular de 50x100x50 mm

Tabla 31

Pruebas de visión del cubo regular de 50x100x50

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	57,74	113,2	58,14	-7,74	-13,2	-8,14
2	57,22	113,52	56,46	-7,22	-13,52	-6,46
3	59,42	117,88	59,82	-9,42	-17,88	-9,82
4	59,02	117,08	59,42	-9,02	-17,08	-9,42
5	59,82	119,16	59,82	-9,82	-19,16	-9,82
6	58,53	109,59	58,14	-8,53	-9,59	-8,14
7	59,02	110,44	58,62	-9,02	-10,44	-8,62

CONTINÚA →

8	57,22	107,5	56,07	-7,22	-7,5	-6,07
9	59,82	112,39	58,62	-9,82	-12,39	-8,62
10	57,22	107,51	56,07	-7,22	-7,51	-6,07
Promedio de Error				-8,50	-	-8,12
					12,827	

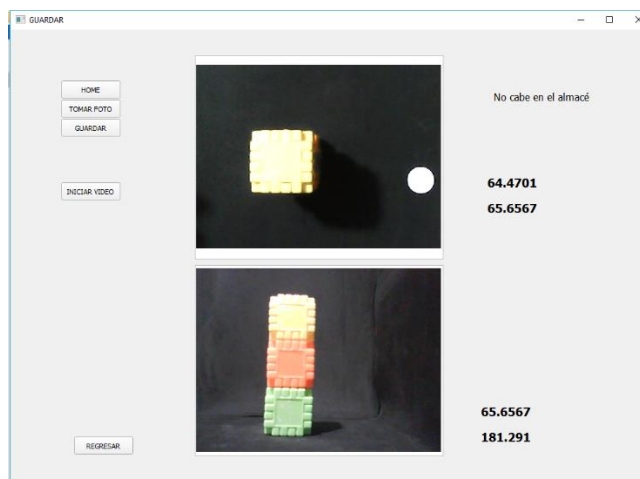


Figura 127. Cubo regular de 50x150x50 mm

Tabla 32

Pruebas de visión del cubo de 50x150x50

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	65,65	181,29	64,47	-15,65	-31,29	-14,47
2	63,75	178,7	62,6	-13,75	-28,7	-12,60
3	64,3	180,23	63,52	-14,30	-30,23	-13,52
4	63,75	178,7	62,21	-13,75	-28,7	-12,21
5	64,69	186,05	63,52	-14,69	-36,05	-13,52
6	66,65	191,68	65,44	-16,65	-41,68	-15,44
7	66,65	191,68	65,44	-16,65	-41,68	-15,44
8	67,67	192,61	67,26	-17,67	-42,61	-17,26
9	65,08	187,17	63,52	-15,08	-37,17	-13,52
10	65,08	187,17	63,52	-15,08	-37,17	-13,52
Promedio de Error				-15,33	-35,528	-14,15

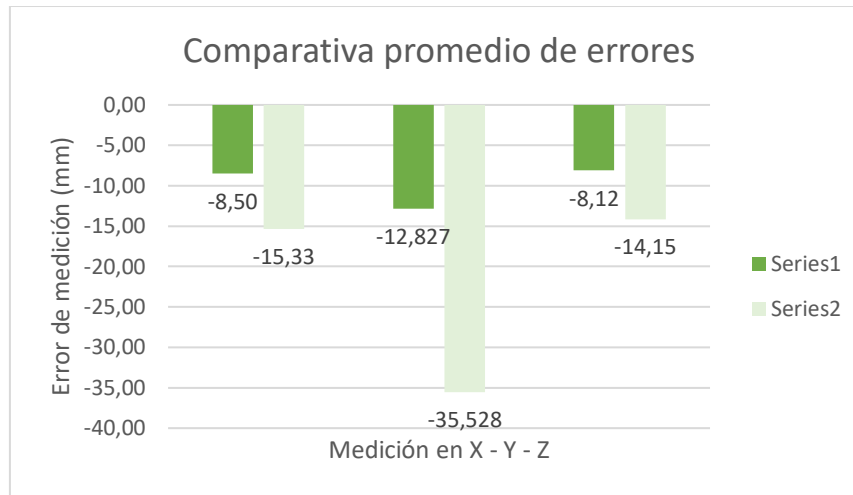


Figura 128. Comparación del promedio de errores (Series1: Cubo 50x100x50 [mm], Series2: Cubo 50x150x50 [mm])

Con los resultados de las tablas 31 y 32 se realiza una comparativa de errores como se observa en la figura 128, conforme la altura aumenta el error de medición se incrementa en todos los ejes llegando a un máximo de -15,33 [mm] en X, 35,528 [mm] en Y y 14,15 [mm] en Z, en las piezas con altura real de 150 [mm]. Por lo tanto, el promedio de error crítico de medición será de 35,528 [mm], más grande, en figuras regulares cúbicas. Este error crítico se debe a la perspectiva de la cámara con respecto al objeto y referencia, el mismo se acepta pues aparte de no ser exagerado, se puede compensar con un factor de corrección en la etapa de reconocimiento de módulos de almacenamiento para la optimización de espacios.

5.1.2. Pruebas medición figuras irregulares.

Esta prueba permitió determinar la fiabilidad del sistema para medir objetos irregulares, para ello se ha elegido cuatro tipos de objetos irregulares como se muestran en las figuras 129, 130, 131 y 132 respectivamente, cada una con diferentes medidas, colores, características y rasgos diferentes.

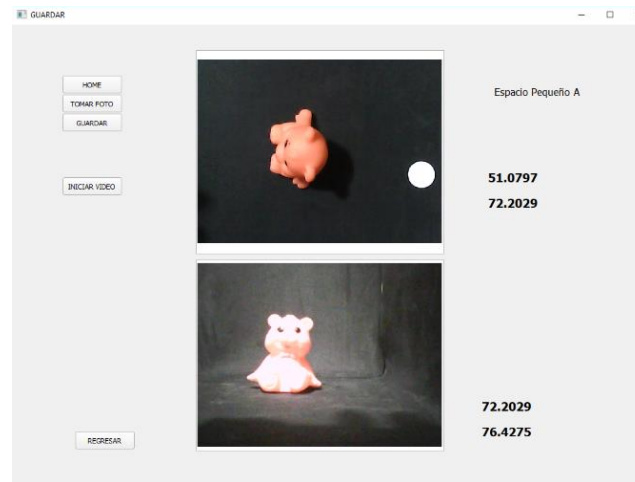


Figura 129. Pieza irregular 1 (pequeño naranja)

Tabla 33

Pruebas de visión de la pieza irregular 1

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	72,20	76,42	51,08	10,80	3,58	4,92
2	71,43	74,53	51,08	11,57	5,47	4,92
3	73,26	76,64	51,83	9,74	3,36	4,17
4	75,08	78,54	53,4	7,92	1,46	2,60
5	75,08	78,14	53,4	7,92	1,86	2,60
6	72,2	78,25	51,46	10,80	1,75	4,54
7	75,48	80,62	53,8	7,52	-0,62	2,20
8	75,08	79,82	54,2	7,92	0,18	1,80
9	75,48	80,62	54,2	7,52	-0,62	1,80
10	75,48	80,62	54,2	7,52	-0,62	1,80
Promedio de Error				8,92	1,58	3,14

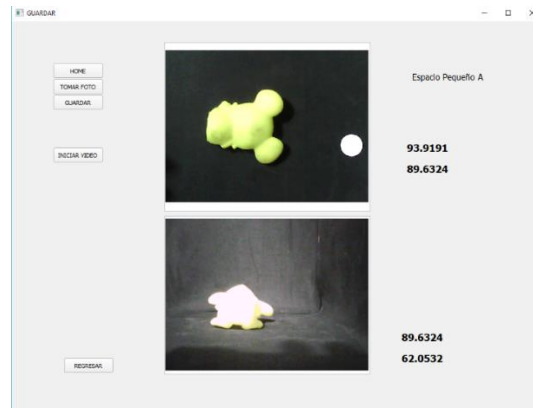


Figura 130. Pieza irregular 2 (pequeño verde)

Tabla 34

Pruebas de visión de la pieza irregular 2

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	89,63	62,05	93,92	2,37	-12,05	-1,92
2	90,02	62,18	93,91	1,98	-12,18	-1,91
3	90,97	62,7	95,71	1,03	-12,7	-3,71
4	94,17	64,9	98,66	-2,17	-14,9	-6,66
5	91,36	63,11	95,71	0,64	-13,11	-3,71
6	87,07	59,86	91,23	4,93	-9,86	0,77
7	92,75	63,62	96,76	-0,75	-13,62	-4,76
8	87,45	60,41	91,23	4,55	-10,41	0,77
9	92,34	63,48	96,76	-0,34	-13,48	-4,76
10	90,02	61,75	93,91	1,98	-11,75	-1,91
Promedio de Error				1,42	-12,41	-2,78

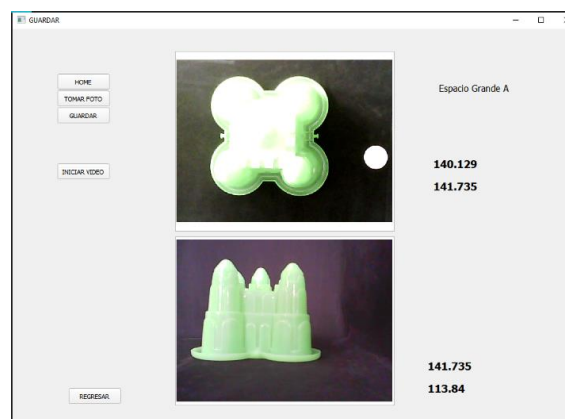
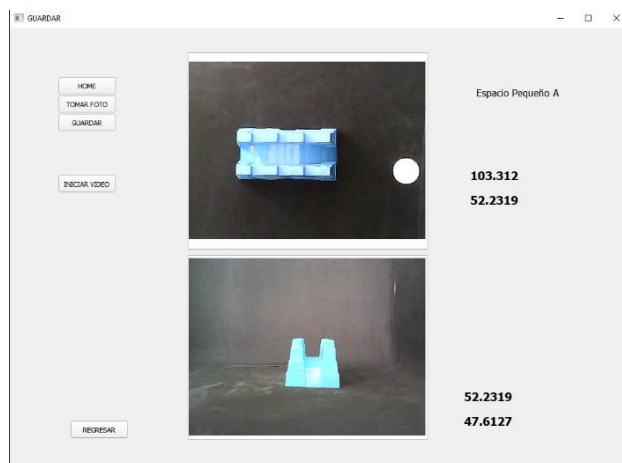


Figura 131. Pieza irregular 3 (grande verde)

Tabla 35*Pruebas de visión de la pieza irregular 3*

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	142,13	114	140,13	-2,13	-6	-0,13
2	142,13	115,74	140,53	-2,13	-7,74	-0,53
3	135,95	110,42	134,8	4,05	-2,42	5,20
4	142,53	115,69	140,93	-2,53	-7,69	-0,93
5	135,95	110,71	143,03	4,05	-2,71	-3,03
6	142,53	115,76	140,13	-2,53	-7,76	-0,13
7	140,01	112,53	138,03	-0,01	-4,53	1,97
8	135,95	109,26	134,8	4,05	-1,26	5,20
9	142,13	115,43	140,12	-2,13	-7,43	-0,12
10	136,34	110,14	134,8	3,66	-2,14	5,20
Promedio de Error				0,44	-4,97	1,27

**Figura 132.** Pieza irregular 4 (hueca azul pequeña)**Tabla 36***Pruebas de visión de la pieza irregular 4*

Prueba	Longitud X medida [mm]	Longitud Y medida [mm]	Longitud Z medida [mm]	Error X [mm]	Error Y [mm]	Error Z [mm]
1	34,18	31,15	99,47	20,82	16,85	16,53
2	54,18	49,39	106,79	0,82	-1,39	9,21
3	54,6	49,77	108	0,40	-1,77	8,00
4	53	47,95	104,83	2,00	0,05	11,17
5	53,79	48,66	106,79	1,21	-0,66	9,21
6	54,18	49,02	106,79	0,82	-1,02	9,21

CONTINÚA →

7	53	48,31	105,22	2,00	-0,31	10,78
8	52,23	47,25	103,69	2,77	0,75	12,31
9	52,23	47,61	103,31	2,77	0,39	12,69
10	51,86	47,27	102,21	3,14	0,73	13,79
Promedio de Error				3,68	1,362	11,29

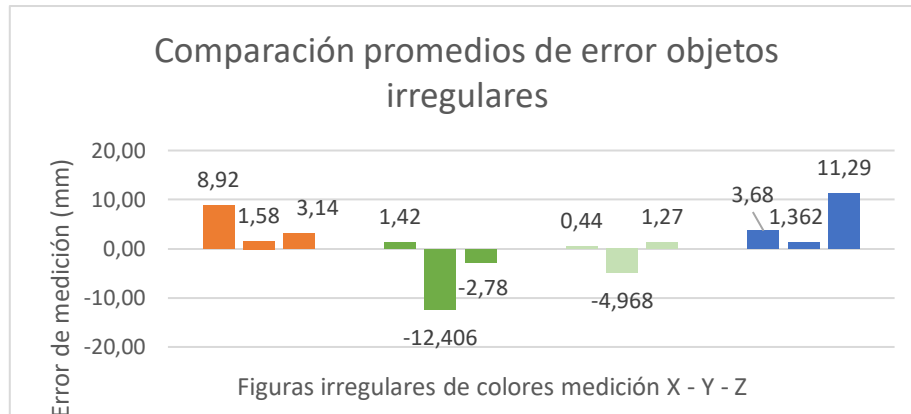


Figura 133. Promedio de errores de piezas irregulares

Con los resultados de las tablas 33, 34, 35 y 36, se realiza una comparación de errores de medición. Al interpretar la gráfica se observa que el máximo promedio de error se da en la medición de Y de una figura irregular verde pequeña, como en los anteriores casos este error se compensaría con el factor de corrección en el algoritmo de reconocimiento de módulo de almacenamiento.

El nuevo aspecto a notar en estas pruebas es que existen errores positivos considerables, lo que significa que el sistema midió un máximo de 11,29 [mm] en Z de la figura irregular celeste hueca, por lo tanto la medida real es 11,29 [mm] más grande de lo medido. Si bien en la selección de módulo de almacenamiento el objeto en teoría cabría en determinado espacio, en realidad no lo haría, afortunadamente el error no es considerable para la aplicación de selección de módulos de almacenamientos y debido a la holgura con la que se diseñó cada espacio y la compensación realizada por software, los productos con dicho error de medida se guardarán correctamente.

5.1.3. Pruebas de error en la medición.

Se han tomado 70 mediciones de forma continua de las diferentes piezas medidas anteriormente para determinar cuántas mediciones arrojan resultados “basura”, es decir resultados que no pueden ser contabilizados para el futuro reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento.

De acuerdo a la tabla 37 obtenemos un porcentaje de efectividad del 92,86% en 70 pruebas simultáneas. Además, observamos que los 5 errores que se presentaron fueron únicamente con el objeto hueco de color azul, lo cual significa que se tiene problemas con este tipo de objetos, pero aun así el índice general de efectividad es bueno.

Tabla 37

Pruebas de errores de medición

Objeto	Número de Pruebas	Resultados Contables	Resultado Basura
Irregular verde pequeña	10	10	0
Cubo pequeño naranja	10	10	0
Irregular pequeño naranja	10	10	0
Irregular grande verde	10	10	0
Cubo pequeño amarillo	10	10	0
Cubo pequeño azul	10	10	0
Irregular hueca azul pequeña	10	5	5
Total	70	65	5

5.1.4. Pruebas de precisión y repetibilidad del manipulador.

En primera instancia para probar la precisión del manipulador se enviará al mismo desde la posición *home* hacia 5 diferentes coordenadas mediante códigos G. Cabe recalcar que como la máquina ya se encuentra ensamblada se moverán por separado los ejes (evitando choques). Para comprobar la precisión se empleará un calibrador con una precisión de 0.02 [mm]. Como se observa en la tabla 38 los promedios de error de precisión en ninguno de los ejes supera los 0,1 [mm] lo que

sustenta la premisa de precisión tanto en el sistema electrónico, mecánico y de control.

Tabla 38

Pruebas de precisión

Prueba	Coordenada Requerida [mm]			Error [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	10	10	10	0,04	0,1	0,06
2	50	50	50	0,04	0,1	0,06
3	100	100	100	0,04	0,1	0,06
4	150	150	150	0,04	0,1	0,06
5	200	200	200	0,04	0,1	0,06
Promedio Error				0,04	0,1	0,06

De igual forma para demostrar que la máquina está dotada de repetibilidad se enviará cada eje a una misma coordenada por cinco veces consecutivas y se medirá el error en cada repetición.

En la tabla 39 se puede observar que la máquina en las cinco pruebas regreso a la misma posición (tomando en cuenta el error de precisión existente), lo que corrobora repetibilidad en los sistemas electrónicos, mecánicos y de control de movimiento.

Tabla 39

Prueba de repetibilidad

Prueba	Coordenada Requerida [mm]			Error [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	200	200	200	0,04	0,1	0,06
2	200	200	200	0,04	0,1	0,06
3	200	200	200	0,04	0,1	0,06
4	200	200	200	0,04	0,1	0,06
5	200	200	200	0,04	0,1	0,06
Promedio				0,04	0,1	0,06

5.1.5. Pruebas de almacenamiento sistema AS/RS vs Operario.

Para corroborar que la máquina es más eficiente operada por visión artificial que cuando la maneja un operario humano se han realizado seis pruebas de

almacenamiento. La prueba consiste en seleccionar diez objetos que se encuentren en el rango dimensional de la máquina y guardarlos con el sistema AS/RS comandado por visión artificial (Tabla 40), después guardarlos manualmente con cinco operarios humanos diferentes (Tablas 41, 42, 43, 44 y 45). Previo a guardar los objetos los operarios conocen las dimensiones de los almacenadores, pero tienen prohibido medir los objetos a guardar.

El operario #1 (Tabla 41) es una persona de 25 años con formación de tercer nivel en el área técnica (Ing. Mecatrónica), el operario #2 (Tabla 42) es una persona de 24 años con formación de tercer nivel en el área técnica (Ing. Mecatrónica), el operario #3 (Tabla 43) es una persona de 50 años con formación de cuarto nivel en el área humanística (docente) con conocimientos técnicos empíricos, el operario #4 (Tabla 44) es una persona de 46 años, utiliza lentes de regulación media, con formación de tercer nivel en el área humanística (docente) sin conocimientos técnicos y el operario #5 (Tabla 45) es una persona de 18 años, con formación secundaria sin conocimientos técnicos.

Tabla 40

Prueba guardado automático

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1	x					1
2				X		1
3			X			1
4			X			1
5				X		1
6	x					1
7			X			1
8			X			1
9				X		1
10			X			1
Total					0	10

Tabla 41

Prueba Operario #1

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1	x					1
2				X		1
3				X	1	

CONTINÚA 

4		X				
5			X			
6		X			1	
7			X			1
8			X			1
9			X			
10		X				
Total					2	4

Tabla 42*Prueba Operario #2*

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1	x					1
2				x		1
3			X			1
4			X			1
5			X			
6	x					1
7		X				
8			X			1
9			X			
10			X			1
Total					0	7

Tabla 43*Prueba Operario #3*

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1	X					1
2				x		1
3		X				
4		X				
5		X				
6	X					1
7			X			1
8			X			1
9			X			
10	X					
Total					0	5

Tabla 44*Prueba Operario #4*

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1		X			1	
2				x		1
3			X			1
4			X			1
5			X			
6		X			1	
7			X			1
8			X			1
9			X			
10		X				
Total					2	5

Tabla 45*Prueba Operario #5*

Objeto	Lugar de Almacenamiento				Error	Optimización
	1	2	3	4		
1	X					1
2				x		1
3			X			1
4		X			1	
5			X			
6	X					1
7		X			1	
8			X			1
9			X			
10	X					
Total					2	5

Como se observa en las tablas de prueba el sistema AS/RS obtuvo una efectividad del 100%, es decir no existieron errores (objetos que no caben en el espacio seleccionado) y mediante visión artificial se reconoció las dimensiones del espacio óptimo para las diez piezas guardadas. Mientras que el operario de mejor rendimiento tuvo un porcentaje de error del 0% y un porcentaje de optimización del 70%. El promedio general de la máquina operada manualmente tiene un error del 12% y un porcentaje de optimización de espacios del 52%.

Ante los resultados obtenidos se corrobora que la máquina operada por visión artificial funciona de forma más eficiente que si fuera manejada manualmente.

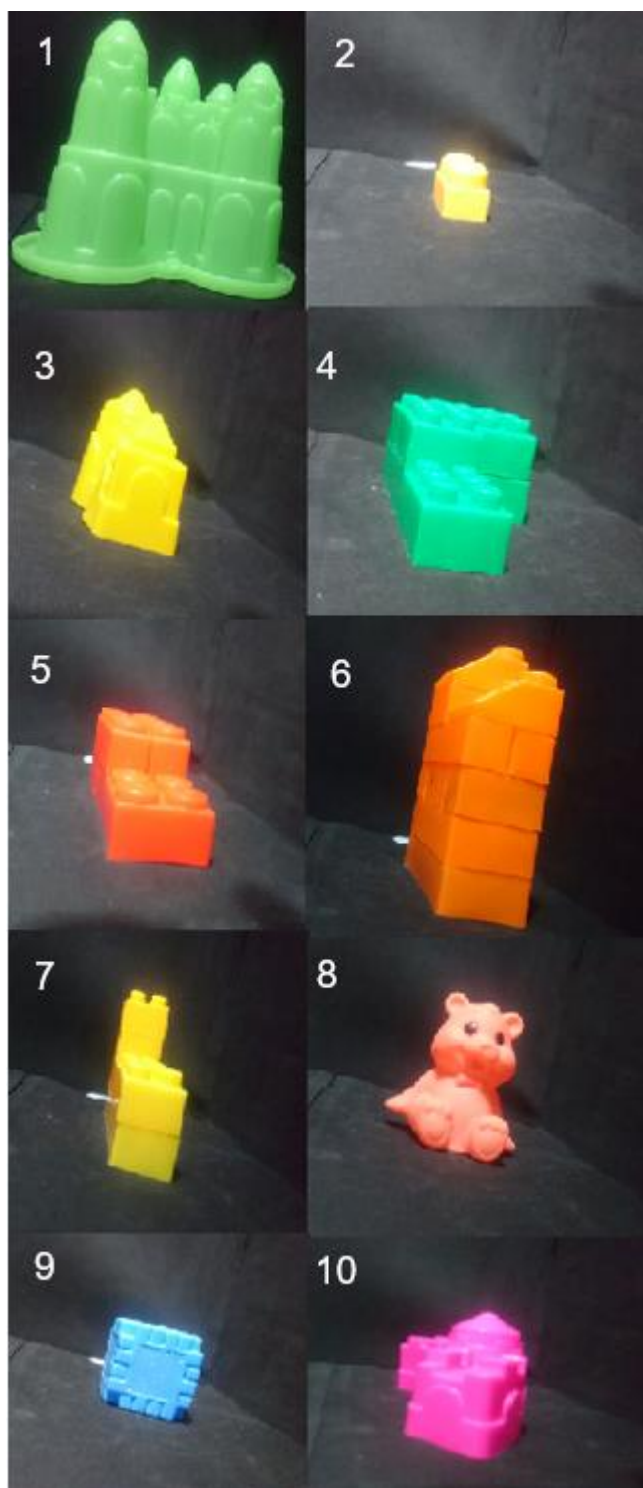


Figura 134. Objetos usados para la prueba humano vs máquina

5.1.6. Pruebas optimización de espacios de almacenamiento.

Para validar que el sistema de visión artificial está reconociendo el módulo de almacenamiento con dimensiones óptimas, para el almacenaje del producto analizado y el manipulador guarde y recupere correctamente dicho objeto, se han realizado 64 pruebas consecutivas, estas pruebas consisten en analizar 64 objetos regulares e irregulares de diferentes colores y dimensiones al azar, al obtener las medidas del objeto el sistema AS/RS reconocerá el módulo donde se debe guardar el producto. Para comprobar la efectividad del proceso, manualmente se ha verificado si el módulo seleccionado es el óptimo.

Tabla 46

Pruebas de optimización de espacios

Objeto #	Lugar de Almacenamiento				Optimización (0/1)	Error (0/1)
	1	2	3	4		
1				X	1	0
2			X		1	0
3			X		1	0
4			X		1	0
5			X		1	0
6			X		1	0
7			X		1	0
8				X	1	0
9	X				1	0
10			X		1	0
11			X		1	0
12			X		1	0
13				X	0	1
14				X	1	0
15			X		1	0
16				X	1	0
17			X		1	0
18			X		1	0
19				X	0	1
20			X		1	0
21				X	1	0

CONTINÚA 

22		X		1	0
23		X		1	0
24			X	0	1
25		X		1	0
26		X		1	0
27		X		1	0
28		X		1	0
29		X		1	0
30	x			1	0
31		X		1	0
32	x			1	0
33				0	1
34		X		1	0
35	x			1	0
36		X		1	0
37	x			1	0
38		X		1	0
39		X		1	0
40		X		1	0
41		X		1	0
42	x			1	0
43	x			1	0
44		x		1	0
45		x		1	0
46		X		1	0
47			X	0	1
48			X	1	0
49		X		1	0
50		X		1	0
51		X		1	0
52		X		1	0
53		x		1	0
54			X	1	0
55			X	1	0

CONTINÚA 

56	X	1	0
57		0	1
58	X	1	0
59	X	1	0
60	X	0	1
61	X	1	0
62	X	1	0
63	X	1	0
64	X	1	0
Total		57	7

Como se observa en la tabla 46 se han analizado 64 objetos, en dichas pruebas se registraron 7 errores, teniendo un 90.63% de efectividad. Cabe recalcar que los errores se produjeron cuando la luz ambiental era baja y se analizaban objetos de color oscuro.

5.2. Análisis de costos

En este apartado se realizará un análisis de costos del sistema AS/RS y se comparará con otros sistemas existentes.

En la tabla 47 se observa un resumen del costo de materiales, construcción e implementación del sistema AS/RS.

Tabla 47

Resumen de costos del proyecto

Cantidad	Detalle	Valor unitario \$	Valor Total \$
Estructura de almacenadores, caja de control y base de la máquina			
1	Materiales estructura de almacenadores, caja de control y base de la máquina	400	400
1	Plancha de acrílico para	100	100

CONTINÚA 

separadores			
1	Construcción de almacenadores, base de la máquina, construcción de componentes diseñados, ensamblaje y pintura.	350	350
Subtotal			850
Manipulador cartesiano			
2	Rieles SBR12 Longitud 1400 [mm]	80	160
2	Rieles SBR16 Longitud 1200 [mm]	130	260
2	Rieles planas MGN12 Longitud 700 [mm]	35	70
1	Tornillo SFU1610 Longitud 1200 [mm]	130	130
2	Tornillo SFU1610 Longitud 1000 [mm]	90	180
1	Tornillo CNC diámetro 8 [mm], 4 entradas, Longitud 600 [mm]	35	35
4	Rodamientos SBR16UU	4.50	18
4	Rodamientos SBR12UU	4.50	18
4	Kit BK/BF + acoples flexibles	22.50	90

Subtotal			961
Sistema Eléctrico y de Control			
2	Motor NEMA 23HS22-2804S	36	72
2	Motor NEMA 23HS30-2804S	48	96
3	Driver paso a paso TB6600	25	75
1	Fuente de voltaje 24 [V]	32	32
Subtotal			275
Sistema de Visión Artificial			
1	Cámara i-SOURCE unlimited	15	15
1	Cámara Logitech C170	25	25
1	Impresión 3D soportes	12	12
1	Materiales e implementación de la estructura del módulo de visión artificial	20	20
Subtotal			72
Pallets			
4	Prototipo de pallet de madera	5	20

CONTINÚA 

1	Impresión 3D prototipo pallet small	10	10
6	Pallets grandes de madera	2.75	16.50
10	Pallets medianos de madera	2.50	25
24	Pallets pequeños de madera	2.00	48
24	Pallets small de madera	1.90	45.60
Subtotal			165.1
Herramientas y materiales varios			50
Total			\$ 2373.10

La inversión total de implementación del sistema AS/RS es de \$2373.10. Se tomará como referencia el proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE ALMACENAMIENTO/ RECUPERACIÓN (AS/RS), PARA SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA EN EL LABORATORIO CNC DE LA ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA, UTILIZANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES” de Capilla C. y Pulloquina J. desarrollado en el 2014 en este proyecto se invirtió \$2855.00 en materiales, sin considerar la mano de obra (\$7600), obteniendo una reducción de \$481.90.

Además, el presente proyecto permite albergar en una estructura de dimensiones 1296x1470 [mm] (en X y Z respectivamente) 64 objetos con una dimensión máxima de 150x150x150 [mm], mientras que el proyecto de Capilla C. y Pulloquina J. alberga un máximo de 36 objetos con dimensiones máximas de 100x100x100 [mm] en una estructura con envergadura de 1500x1000 [mm] (en X y Z respectivamente).

5.3. Resumen de características obtenidas en las pruebas

Tabla 48

Cuadro resumen características de pruebas de visión y manipulador

Prueba	Error máximo	Descripción
Medición figuras regulares cúbicas.	+ 35.528 [mm]	El error máximo se presenta en el eje Y cuando se mide figuras de 150 [mm] de altura.
Medición figuras irregulares	-12.406 [mm]	El error máximo se presenta en el eje Y con una figura irregular verde de 140 [mm] de altura.
Errores de medición	5 errores	En 70 pruebas consecutivas de 7 tipos de figuras se presentaron 5 errores de visión artificial en la figura irregular hueca azul pequeña.
Precisión del manipulador	0,1 [mm]	El promedio de error máximo de precisión del manipulador en 5 pruebas es en el eje Y.
% de efectividad en acciones de repetibilidad del manipulador	%100	El promedio de error máximo de repetibilidad del manipulador en 5 pruebas es 0 en los 3 ejes, pues siempre el manipulador se desplazó hacia el mismo lugar.

Tabla 49

Cuadro resumen características de funcionamiento sistema AS/RS

Prueba	Porcentaje de error	Porcentaje de optimización	Porcentaje de guardado sin optimización	Número de pruebas
Optimización sistema AS/RS mediante visión artificial	0%	100%	0%	10

CONTINÚA 

Optimización sistema AS/RS operado por un usuario	12%	52%	36%	10
Funcionamiento integral sistema AS/RS	9.37%	90.63%	0%	64

5.4. Validación de la hipótesis

¿El diseño e implementación de un prototipo de sistema flexible de almacenamiento/recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial, permitirá la selección de módulos de almacenamiento mediante el reconocimiento dimensional de objetos y la optimización de espacios en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga?

- **Variable Independiente**

Sistema flexible de almacenamiento / recuperación (AS /RS) automatizado mediante visión artificial.

- **Variable Dependiente**

Selección de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.

Para validar la hipótesis se usará el método del Chi-Cuadrado, mediante el cual se determinará si la variable independiente que es un Sistema flexible de almacenamiento / recuperación (AS /RS) automatizado mediante visión artificial está relacionada con el cumplimiento de la variable dependiente que es la selección de módulos de almacenamiento para optimizar espacios al guardar productos.

Como primer paso definimos la hipótesis nula H0 y la hipótesis alternativa H1:

- Hipótesis Nula (H0)

El diseño e implementación de un prototipo de sistema flexible de almacenamiento/recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial, no permitirá la selección de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.

- Hipótesis Alternativa (H1)

El diseño e implementación de un prototipo de sistema flexible de almacenamiento/recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial, permitirá la selección de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.

Usando los valores de la tabla 46 correspondiente a las pruebas de funcionamiento de la máquina, se realiza la tabla 50 de frecuencia de valores observados (F_o).

Tabla 50

Frecuencia de valores observados

Frecuencia de valores observados			
Reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.	Almacena y recupera automáticamente mediante visión artificial.		TOTAL
	SI	NO	
SI	57	0	57
NO	5	2	7
TOTAL	62	2	64

El siguiente paso es calcular la frecuencia de valores esperados detallados en la tabla 51, para ello se utiliza la ecuación 24:

$$F_e = \frac{O_i * O_j}{O} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde:

$O_i \rightarrow$ Frecuencia total observada fila

$O_j \rightarrow$ Frecuencia total observada columna

$F_e \rightarrow$ Frecuencia esperada

$O \rightarrow$ Total

Tabla 51*Frecuencia de valores esperados*

Frecuencia de valores esperados			
Reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.	Almacena y recupera automáticamente mediante visión artificial.		TOTAL
	SI	NO	
SI	55.22	1.78	57
NO	6.78	0.22	7
TOTAL	62	2	64

Se procede a calcular el Chi-Cuadrado mediante la ecuación 25:

$$x^2_{calculado} = \sum \frac{(F_o - F_e)^2}{F_e} \quad \text{Ec. 25}$$

$$x^2_{calculado} = \frac{(57 - 55.22)^2}{55.22} + \frac{(0 - 1.78)^2}{1.78} + \frac{(5 - 6.78)^2}{6.78} + \frac{(2 - 0.22)^2}{0.22}$$

$$x^2_{calculado} = 0.06 + 1.78 + 0.47 + 14.4$$

$$x^2_{calculado} = 16.71$$

Se procede a calcular el número de grados de libertad (n) mediante la ecuación 26:

$$n = (\text{número de filas} - 1) * (\text{número de columnas} - 1) \quad \text{Ec. 26}$$

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

$$n = 1$$

Elegimos un valor de significancia de $p=0.001$ para un alto rendimiento del sistema, finalmente buscamos el Chi-Cuadrado crítico ($x^2_{crítico}$) en la tabla 52 de acuerdo con los datos de n y p :

Tabla 52

Valores de probabilidad

Grados de libertad	Probabilidad									
	0.95	0.90	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.10	0.05	0.001
1	0.004	0.02	0.06	0.15	0.46	1.07	1.64	2.71	3.84	10.83

Una vez obtenidos los valores del Chi-Cuadrado calculado y Chi-Cuadrado crítico pasamos a comprobar nuestra hipótesis con la relación:

$$x^2_{calculado} > x^2_{crítico}$$

$$16.71 > 10.83$$

Como observamos la condición se cumple por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa y se descarta la hipótesis nula, por lo tanto: El diseño e implementación de un prototipo de sistema flexible de almacenamiento/recuperación AS/RS automatizado mediante visión artificial, permitirá el reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un prototipo de sistema flexible de almacenamiento recuperación (AS /RS) automatizado mediante visión artificial para el reconocimiento dimensional de módulos de almacenamiento y optimización de espacios, para el Laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, obteniendo un porcentaje general de efectividad del 90.63% en el sistema, siendo el principal inconveniente la medición de objetos con altura superior a 100 [mm] y/o objetos irregulares huecos debido el método de visión artificial elegido.
- Se investigó acerca de sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados, para después determinar una configuración que permitió reducir costos y aumentar la capacidad de almacenamiento.
- Mediante el uso de cámaras web y el software Qt Creator 4.2.2. con sus extensiones OpenCv se implementó un sistema de selección dimensional y optimización de espacios en módulos de almacenamiento a través de la medición de objetos por visión artificial. Se determinó que en una prueba humano vs. máquina, siempre y cuando las condiciones lumínicas sean óptimas, el porcentaje aproximado de efectividad del sistema de visión artificial es del 100%, mientras que el humano presenta un promedio de optimización de espacios del 52%, un funcionamiento sin optimización del 36% y un error del 12%
- Usando el software SolidWorks 2017 se diseñó una estructura y manipulador cartesiano robusto para el sistema AS/RS, obteniendo un robot cartesiano con un error máximo de precisión de 0,1 [mm] y una repetibilidad con un porcentaje de efectividad del 100%.
- Mediante lenguaje C++ con el software compilador Qt Creator, el uso de una tarjeta Arduino con el software GRBL y el software Universal Gcoder Sender para la configuración del sistema se implementó un sistema eléctrico y de control que

proporciona precisión, repetibilidad y rapidez al manipulador y sistema en general. Se determinó que operar una máquina mediante códigos G resulta sencillo y económico debido a la existencia gratuita del código GRBL de Arduino, siempre y cuando la estructura mecánica sea robusta y funcional.

- Haciendo uso de C++ con el compilador Qt Creator 4.2.2. se implementó un sistema de registro de objetos almacenados, permitiendo que el sistema esté al tanto de los espacios disponibles que posee.
- Gracias al software Qt Creator 4.2.2. se diseñó e implementó un panel de control para la supervisión e interacción del operario con la máquina durante el proceso de almacenaje y recuperación, proveyendo la posibilidad de visualizar los espacios ocupados, porcentaje total de ocupación de los almacenes y visualización de los objetos a recuperar con sus respectivas medidas.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento y validó el funcionamiento del sistema AS/RS que validaron la precisión y repetibilidad del manipulador, la optimización de espacios de almacenamiento que presenta el accionar automático de la máquina operada mediante visión artificial, frente a accionar manual al ser operada por el humano y finalmente el funcionamiento integral de la máquina con un 90.63% de efectividad.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda siempre enviar a la máquina a su posición home tanto al encenderla o apagarla.
- Se recomienda no manipular los pallets una vez que los mismos sean ubicados por el manipulador en el sitio deseado.
- Para el correcto funcionamiento del sistema del manipulador cartesiano se recomienda mantener lubricado el sistema de transmisión.
- Las velocidades a las cuales están configurados cada uno de los ejes de movimiento permiten transportar la carga crítica especificada en este trabajo, cuando la máquina transporta objetos de menor peso supera la fuerza promedio de un hombre adulto, por lo cual se recomienda no acercarse a la máquina en movimiento para prevenir posibles accidentes.

- De ser necesario una mayor velocidad o potencia en el manipulador se sugiere incluir un driver adicional únicamente para el eje Y, pues actualmente los dos motores comparten un mismo driver y son los motores que movilizan una mayor carga.
- Si se desea utilizar la máquina de forma manual, usando el software *Universal Gcode Sender*, se recomienda verificar las unidades del mismo, familiarizarse con los ejes y direcciones de movimientos con las cuales se configuró la máquina para que no existan choques.
- En caso de tener problemas de falsos positivos en los finales de carrera se sugiere revisar en primer lugar el correcto funcionamiento del circuito de filtrado de señales.
- Para usar el programa desarrollado en un pc diferente, se recomienda revisar que se ha cambiado todas las direcciones de guardado y búsqueda de archivos en la programación, para que no existan errores de compilación.
- Si es necesario usar la máquina en la noche o en un ambiente extremadamente oscuro se recomienda usar la lámpara portátil anexa al sistema de visión artificial.

6.3. Trabajos Futuros

- Como trabajo futuro se sugiere trabajar en la programación del presente proyecto para que pueda almacenar más de una pieza por pallet y de esta forma optimizar aún más los espacios de almacenamiento.
- De tener una demanda superior para el guardado de objetos, o el requerimiento de nuevas dimensiones para los módulos de almacenamiento, se recomienda construir estructuras de almacenadores adicionales, pues el costo de construcción de estas es bajo y la máquina se ha diseñado para que las mismas puedan ser intercambiadas con facilidad, además no requiere de mayores cambios en el software de control.
- Para integrar la máquina a una línea de manufactura y optimizar aún más los espacios de almacenamiento se debería implementar un manipulador que coloque el objeto a guardar en una orientación óptima, es decir, que al momento

de medir mediante visión artificial el producto, los vértices del objeto formen el rectángulo de menor área posible.

Bibliografía

- Almacenamiento de materiales. (s.f.). *VirtualNet2*. Recuperado el 01 de noviembre de 2017, de http://virtualnet2.umb.edu.co/virtualnet/archivos/open.php/698/mod1/pdf/ModuloUno_AlmaMerca.pdf
- ARDUINO. (2018). Recuperado el 15 de Agosto de 2018, de <http://arduino.cl/arduino-uno/>
- Bohlke, K. (1995). *Using Input Shaping to Minimize Residual Vibration in Flexible Space Structures*. Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology.
- Bruno Siciliano, O. K. (2008). *Handbook of Robotics* (Primera ed.). Berlin Heidelberg: Springer.
- C. F. Cutforth, L. Y. (1999). A modified method for multiple actuator input shaping. *American Control Conference*, 1, págs. 66–70.
- Cabeza, H. R. (s.f.). *Infaimon*. Recuperado el 15 de octubre de 2017, de http://www.jcee.upc.edu/JCEE2010/pdf_ponencias/PDFs/25_11_10/INFAIMON-Vision%20artificial.pdf
- Calsina, H. (Abril de 2009). *Sistemas de almacenamiento modernos*. Recuperado el 25 de marzo de 2018, de Logircop: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v12_n1/a06.pdf
- Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control: Fundamental algorithms in Matlab*. (Primera ed.). Berlin Heidelberg: Springer.
- DEMATIC. (2018). *RapidStore Almacenes Automatizados MiniLoad*. Recuperado el 25 de febrero de 2018, de <https://www.dematic.com/es-ec/soluciones-supply-chain/por-tecnolog%C3%ADa/storage-systems/automated-storage-and-retrieval-systems/rapidstore-mini-load-asrs/>
- Druzella, U. (2010). *Tendències, aplicacions, recerca i docència* (pág. 34). Cataluña: SICK.
- Druzella, U. (s.f.). *SICK (Sensor Intelligence)*. Recuperado el 15 de Mayo de 2018, de

http://www.crit.upc.edu/JCEE2010/pdf_ponencias/PDFs/09_12_10/Vision%20Artificial%20_UNI%20TERRASSA%202010.pdf

DZOOM. (2018). Recuperado el 26 de Agosto de 2018, de <https://www.dzoom.org.es/la-distancia-focal-todo-lo-que-necesitas-saber-explicado-con-ejemplos/>

ElectronicLab. (2018). *Ingeniería y Diseño Electrónico*. Recuperado el 27 de Julio de 2018, de <https://electronilab.co/tienda/driver-micropstepper-motor-paso-paso-tb6600-0-2-5a-12-48vdc/>

Falcón, G. A. (01 de diciembre de 1994). *Tecnológico de Monterrey*. Recuperado el 24 de mayo de 2017, de https://repositorio.itesm.mx/ortec/bitstream/11285/569803/1/DocsTec_10616.pdf

García, M. (24 de Agosto de 2014). *DocPlayer*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2018, de <https://docplayer.es/2899339-Diseno-y-fabricacion-de-una-fresadora-cnc-de-3-ejes-para-el-mecanizado-de-pcb-con-plataformas-de-desarrollo-abiertas.html>

GIEICOM. (2017). Recuperado el 25 de Agosto de 2018, de <https://gieicom.com/almacenamiento-automatico/uniload-asrs/>

Gómez, J. (05 de abril de 2013). *El Interior del Almacén*. Recuperado el 24 de septiembre de 2017, de <http://manipulacion-seguridad-almacen.blogspot.com/2013/04/almacenamiento-convencional.html>

Handson Technology. (s.f.). Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de <http://www.handsontec.com/dataspecs/cnc-3axis-shield.pdf>

Husillo de Bolas Catálogo General THK. (2018). Recuperado el 07 de Junio de 2018, de https://www.rodacenter.cl/pdf/503LS_A15_BallScrew.pdf

Iglesias, A. (15 de octubre de 2012). *LogisPyme*. Recuperado el 20 de octubre de 2017, de <https://logispyme.files.wordpress.com/2012/10/manual-de-gestic3b3n-de-almacc3a9n.pdf>

IMES-LUH. (Febrero de 2018). *Institute for Mechatronic Systems*. Recuperado el 19 de Febrero de 2018, de <https://goo.gl/yXfVXY>

- Informática Moderna. (s.f.). *Informática Moderna*. Recuperado el 25 de Abril de 2018, de http://www.informaticamoderna.com/Camara_web.htm
- J TECH. (25 de junio de 2018). Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de https://jtechphotonics.com/Downloads/GRBL_Controller/Instruction_Manual_GRBL_Controller_V1_2.pdf
- Kadier, B. (s.f.). *Servicio Nacional de Aprendizaje SENA*. Recuperado el 04 de octubre de 2017, de https://senaintro.blackboard.com/bbcswebdav/institution/semillas/137126_1_VIRTUAL/contenidos/oaaps/oaap2/oas/oa_almacenamientoeinv/recursos/oc.pdf
- Kalaakaar. (2018). Recuperado el 05 de julio de 2018, de <https://kalaakaar.in/cnc-controller-with-arduino-tb6600-and-grbl/>
- Knoblauch, M. (2015). *Linealización de ecuaciones diferenciales*. Universidad Nacional de La Plata., La Plata.
- Logitech. (2018). *Logitech*. Recuperado el 28 de Abril de 2018, de <https://www.logitech.com/es-es/video/webcams>
- López, B. S. (2016). *Ingeniería Industrial Online*. Recuperado el 21 de mayo de 2017, de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gesti%C3%B3n-de-almacenes/sistema-de-almacenamiento-convencional/>
- Mark W. Spong, S. H. (2011). *Robot Modeling and Control* (Primera ed.). John Wiley and Sons.
- Martinez, J. (Octubre de 2012). *Operación de Bodegas*. Recuperado el 25 de Febrero de 2018, de <https://operacionesdebodegasyalmacen.wordpress.com/bodegas-automatizadas/sistemas-automatizados-de-almacenamiento-recuperacion-asrs/>
- Mauleón, M. (2013). *Sistemas de Almacenaje y Picking*. (D. d. Santos, Editor) Recuperado el 15 de octubre de 2017, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=TkcVlts97GgC&oi=fnd&pg=PA33&dq=sistemas+de+almacenamiento+convencional+en+fabricas&ots=Wk3N0d>

BG_A&sig=FjCmUe9eihNjyc8VFP0kBR8DZJU#v=onepage&q=sistemas%20de%20almacenamiento%20convencional%20en%20fabricas&f=false

Mecalux. (s.f.). *Mecalux*. Recuperado el 25 de 09 de 2017, de <https://logismarketar.cdnwm.com/ic/mecalux-argentina-catalogo-general-de-productos-mecalux-342628.pdf>

Mejía Vilet , J. R. (Enero de 2005). *READ PUDN*. Recuperado el 25 de Junio de 2018, de http://read.pudn.com/downloads159/ebook/711796/Procesamiento_Digital_de_Imagenes.pdf

Mendonça, M. B. (2015). Development and Control of a Prototype Manipulator SCARA Type as Teaching Tool. *International Federation of Automatic Control* (págs. 209-2013). Salvador, Brazil: ScienceDirect.

Mérida. (2010). *Universidad de los Andes*. Recuperado el 30 de Enero de 2018, de <http://www2.ula.ve/dsiportal/dmdocuments/elementos/TORNILLOPOTENCIA.pdf>

Mott, R. L. (1992). *Diseño de Elementos de Máquinas* (II Edición ed.). México: Hispanoamericana S.A. Recuperado el 25 de Agosto de 2018

Noriega, E. (2012). *Bodegas Automatizadas*. Recuperado el 02 de Marzo de 2018, de <https://cadenadesuministros.wordpress.com/bodegas-automatizadas/5-1-sistemas-automatizados-de-almacenamiento-recuperacion-asrs/>

NVidia. (2018). Recuperado el Febrero de 07 de 2018, de <https://www.nvidia.es/object/3d-vision-technology-es.html>

OpenCV. (2014). *Documentación OpenCV*. Recuperado el junio de 2018, de https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/erosion_dilatation/erosion_dilatation.html

Protoneer. (29 de Septiembre de 2013). Recuperado el 15 de Agosto de 2018, de http://tet.pub.ro/pages/altele/Documentatie/Shield%20CNC%20A4988%20v3/Arduino%20CNC%20Shield%20V3.XX%20%E2%80%93%20Assembly%20Guide%20_%20Protoneer.co.pdf

- Pulloquina, C. (2014). *Repositorio ESPE* . Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9118/1/AC-ESPEL-MEC-0028.pdf>
- Querejeta, P. (Julio de 2015). *Universidad Nacional del Sur*. Recuperado el 15 de Julio de 2018, de <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-QuerejetaSimbeniPedro.pdf>
- Reducing deviations from trajectory components with input shaping. (1995). *American Control Conference, 1*.
- Rodriguez, R. (2010). Simulación de un sistema AS/RS . 55-56. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de edicions.uib.cat/ojs/index.php/enginy/article/download/59/41
- Romeo, A. (s.f.). *Ingeniería de Sistemas y Automática*. Recuperado el 25 de Enero de 2018, de <http://automata.cps.unizar.es/robotica/Morfologia.pdf>
- Romero, P. (08 de Agosto de 2014). *AUTOMATIZACIÓN DE ALMACENES MEDIANTE EL USO DE TRANSELEVADORES*. Recuperado el 18 de Febrero de 2018, de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12619/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20FINAL.pdf>
- Ruiz, C. (s.f.). *Elementos de Máquinas*. Recuperado el 26 de Enero de 2018, de <http://files.cesarruiz.webnode.com.co/200000094-cec46d0fac/TransmisionPorCadenas.pdf>
- Ruiz, C. (s.f.). *Elementos de Máquinas*. Recuperado el 25 de Enero de 2018, de <http://files.cesarruiz.webnode.com.co/200000095-1e5b7204f2/TransmisionPorCorreas.pdf>
- Singhose, W. E. (1997). *Command Generation For Flexible Systems*. Massachusetts Institute of Technology.
- SOLECTRO. (s.f.). *SOLECTRO*. Recuperado el 27 de mayo de 2018, de <https://solectroshop.com/product-spa-1195-Fuente-de-Alimentacion-24V-15A-360W.html>

- Step Motors. (2018). *DanaherMotion*. Recuperado el 21 de Mayo de 2018, de <https://users.obs.carnegiescience.edu/crane/pfs/man/Electronics/Superior-StepMotors.pdf>
- SYSTEM Logistics. (2018). Recuperado el 25 de Agosto de 2018, de <http://www.systemlogistics.com/spa/productos/asrs>
- Systems, N. (11 de enero de 2017). Recuperado el 25 de septiembre de 2017, de <https://www.noegasystems.com/blog/estanterias/sistema-convencional-de-almacenaje>
- T. Singh, G. R. (1993). Shaped Input Control of a System With Multiple Modes. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*.
- Vaughan, J. (2008). *Dynamics and control of mobile cranes*. Tesis de Doctorado, Georgia Institute of Technology.
- Vélez, D. (30 de junio de 2017). *Mejoramiento Continuo*. Recuperado el 25 de Febrero de 2018, de <https://mejoramientocontinuo.wordpress.com/2017/06/30/sistemas-automatizados-de-almacenamiento/>
- W. Singhose, N. S. (1994). Initial investigations into the effects of input shaping on trajectory following. *American Control Conference*, 3, págs. 2526-2532.
- W. Singhose, T. C. (1995). Reducing deviations from trajectory components with input shaping., 1, págs. 929-933. doi:DOI 10.1109/ACC.1995.529384
- Wainschenker, R. (2011). Recuperado el 14 de Julio de 2018, de <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/pdi/FILES/TE/CP1.pdf>
- Westfalia. (2018). Recuperado el 25 de Agosto de 2018, de <https://www.westfaliausa.com/es/productos/sistemas-de-recuperacion-y-almacenamiento-automatizado>
- Y., Z., C., W., X., Y., & M., T. (2015). Complete Dynamic Modelling of Flexible Joint Robots. *Proceedings of the ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference*. doi:DOI 10.1115/DSCC2015-9813

- Y., Zhao; C., Wang; X., Yu; M., Tomizuka. (2016). Zero time delay input shaping for smooth settling of industrial robots. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, (págs. 620-625).
- Younis, M. I. (2011). *MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics* (Primera ed.). New York: Springer.

ANEXOS



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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **Cárdenas Rubio, Jhostin Patricio** y el señor **Díaz Quinga, Jonnathan Raúl**.

En la ciudad de Latacunga, a los 30 días del mes de octubre del 2018.

Ing. Andrés Gordón
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO