



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,  
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR  
COMPUTADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO  
POR COMPUTADOR**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE  
CLASIFICACIÓN ASISTIDA POR UN MANIPULADOR ROBÓTICO  
MELFA RV – 2SBD, MEDIANTE EL USO DE VISIÓN ARTIFICIAL  
PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS RECONFIGURABLES Y  
LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD ACTIVA.**

**AUTORA: MOGRO BORJA, MARÍA FERNANDA**

**DIRECTOR: ING. MENDOZA CHIPANTASI, DARIO JOSÉ MSC.**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS**

**CERTIFICACIÓN**

Certificó que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE CLASIFICACIÓN ASISTIDA POR UN MANIPULADOR ROBÓTICO MELFA RV – 2SBD, MEDIANTE EL USO DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS RECONFIGURABLES Y LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD ACTIVA**” realizado por la **Ing. Mogro Borja María Fernanda**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido y/o plagio además cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la **Ing. Mogro Borja María Fernanda** para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, noviembre del 2018**

Atentamente;

Ing. Mendoza Chipantasi, Darío José MSc.

**DIRECTOR**



## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

### CENTRO DE POSGRADOS

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Mogro Borja María Fernanda**, con cédula de ciudadanía N° 0503199598 declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE CLASIFICACIÓN ASISTIDA POR UN MANIPULADOR ROBÓTICO MELFA RV – 2SBD, MEDIANTE EL USO DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS RECONFIGURABLES Y LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD ACTIVA**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

**Sangolquí, noviembre del 2018**

Ing. Mogro Borja, María Fernanda

C.C.: 0503199598



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR**

**COMPUTADOR**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **María Fernanda Mogro Borja**, autorizó a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE CLASIFICACIÓN ASISTIDA POR UN MANIPULADOR ROBÓTICO MELFA RV – 2SBD, MEDIANTE EL USO DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS RECONFIGURABLES Y LA INCORPORACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGURIDAD ACTIVA”** cuyo contenido, ideas y criterios es de mí autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, noviembre del 2018**

Ing. Mogro Borja, María Fernanda

C.C.: 0503199598

## DEDICATORIA

Llena de regocijo, de amor y esperanza quiero dedicar mi proyecto a mi Dios y mi Madre Santísima de las Mercedes por siempre bendecir cada uno de mis días.

A ustedes mis amados padres Wilson y Patricia quienes han sido mis pilares para seguir adelante, por mis principios, mis valores, mi coraje para conseguir mis objetivos porque sin su apoyo incondicional no hubiera podido alcanzar este sueño, gracias por confiar siempre en mí.

A mí querido esposo, por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, por su amor y sus consejos y por brindarme el apoyo incondicional para realizarme profesionalmente.

De manera especial quiero dedicar con mucho amor y cariño a quienes han sido mi motivación e inspiración cada día de mi vida, Sebastián y Mía, mis amados hijos.

A mis hermanos Fabián, Lisbeth, Juan Marcelo, Mayte, Pauli por sus palabras de aliento y porque han sido los padres de mis hijos cuando yo no estaba en casa.

A mis abuelitos, suegros, tíos y sobrinos, gracias por ser parte de mi vida y porque de una u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Con cariño

**María Fernanda Mogro**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y a mi madre de Mercedes por haberme dado el valor y la fuerza para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres por estar presentes no solo en esta etapa de mi vida, sino en todo momento, los amo muchísimo y les doy las gracias infinitamente por tanto amor hacia mí y sobre todo a mis hijos, no habrá manera de devolver tanto amor y felicidad junto a ustedes.

A mi esposo, gracias amor por ser mi motivación, mi apoyo, mi compañero en los buenos y malos momentos, gracias por tu amor y confianza en mí.

A mis hermanos, por estar siempre presentes y acompañarme en esta etapa de mi vida.

A mis abuelitos por sus enseñanzas, su ejemplo y amor, por la vida misma llena de felicidad que me han dado desde mi niñez.

A mis suegros, por sus consejos, su cariño y por estar presentes siempre.

A mis pequeños Sebastián, Mía, Alejandro con su inocencia son mi fuente de inspiración y perseverancia cada día.

A mi tutor Ing. Darío Mendoza, no solo por el apoyo brindado sino también por la amistad de siempre.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CARÁTULA</b>	
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Planteamiento del problema .....	2
1.4. Descripción resumida del proyecto.....	4
1.5. Justificación e importancia.....	5
1.6. Objetivos.....	6
1.6.1. Objetivo General.....	6
1.6.2. Objetivos Específicos .....	6
1.7. Hipótesis.....	7
1.8. Variables de investigación .....	7
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>9</b>
2.1. Manipuladores robóticos industriales .....	9
2.1.1. Brazo robótico Mitsubishi MELFA RV – 2SDB .....	9
2.1.2. Grados de libertad del manipulador robótico .....	11
2.2. Modelamientos matemáticos de manipuladores robóticos .....	12
2.2.1. Modelo cinemático directo .....	13

2.2.2. Modelo cinemático inverso .....	19
2.3. Efectores finales .....	20
2.3.1. Clasificación de efectores finales .....	20
2.3.2. Gripper de presión mecánica.....	22
2.4. Bandas transportadoras .....	23
2.4.1. Tipos de bandas transportadoras .....	23
2.4.2. Componentes de las bandas transportadoras .....	24
2.4.3. Características.....	25
2.5. Visión artificial en celdas robotizadas.....	25
2.6. Sistemas de seguridad activa en robótica .....	26
<b>3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.....</b>	<b>28</b>
3.1. Diseño del gripper adaptativo .....	28
3.1.1. Modelado mecánico del gripper adaptativo .....	29
3.1.2. Selección del motor para la apertura y cierre del gripper .....	31
3.2. Diseño de la banda transportadora .....	32
3.2.1. Modelado mecánico de la banda transportadora.....	33
3.2.2. Selección de componentes de la banda transportadora.....	34
3.3. Selección de componentes para visión artificial .....	39
<b>4. IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA .....</b>	<b>44</b>
4.1. Unión de los subsistemas de línea de clasificación automatizada .....	44
Software .....	45
4.2. Visión artificial.....	45
4.2.1. Adquisición de imagen.....	45
4.2.2. Determinación de la pose .....	46
4.3. Comunicación entre ID Qt (OpenCV) - Matlab. ....	48
4.4. Comunicación entre Matlab – Controlador CR1DA – 700 .....	50
4.5. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	52

4.5.1. Determinación de área útil de cámaras .....	52
Área útil de la cámara de clasificación de piezas.....	53
Área útil de detección de la cámara de seguridad activa .....	55
4.5.2. Verificación del Algoritmo de detección de personas usado para la cámara de seguridad .....	57
4.5.3. Evaluación del algoritmo clasificador de figuras geométricas.....	58
Clasificación de figuras triangulares .....	59
Clasificación de figuras cuadradas .....	60
Clasificación de pentágonos .....	61
4.5.4. Posicionamiento del Brazo robótico sobre las piezas.....	63
4.5.5. Compensación de coordenada X .....	64
4.5.6. Distancia entre piezas .....	66
4.5.7. Prueba del sistema completo .....	67
4.6. Validación de la hipótesis .....	69
4.7. Marco administrativo.....	71
Factibilidad de la investigación .....	71
Recursos materiales.....	71
Talento humano .....	71
Recursos financieros.....	72
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
5.1. Conclusiones .....	73
5.2. Recomendaciones.....	74
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Datos técnicos del brazo Mitsubishi MELFA RV- 2SDB.</i> .....	10
<b>Tabla 2.</b> <i>Parámetros D – H del Mitsubishi RV – 2SDB.</i> .....	14
<b>Tabla 3.</b> <i>Alternativas de diseño.</i> .....	29
<b>Tabla 4.</b> <i>Tipos de banda transportadora</i> .....	32
<b>Tabla 5.</b> <i>Tipos de cintas.</i> .....	35
<b>Tabla 6.</b> <i>Características técnicas del motor eléctrico CNBTR.</i> .....	36
<b>Tabla 7.</b> <i>Criterios de selección de cámaras web.</i> .....	39
<b>Tabla 8.</b> <i>Formato de envío de datos al controlador.</i> .....	50
<b>Tabla 9.</b> <i>Comandos para comunicación Matlab – Controlador (Robot).</i> .....	52
<b>Tabla10.</b> <i>Área de detección en base a la profundidad del sujeto.</i> .....	56
<b>Tabla 11.</b> <i>Escalonamiento con respecto al área</i> .....	56
<b>Tabla 12.</b> <i>Detección de personas según la profundidad</i> .....	57
<b>Tabla 13.</b> <i>Detección de triángulos.</i> .....	59
<b>Tabla 14.</b> <i>Detección de figuras cuadradas.</i> .....	61
<b>Tabla 15.</b> <i>Detección de pentágonos.</i> .....	62
<b>Tabla 16.</b> <i>Posicionamiento del brazo robótico.</i> .....	64
<b>Tabla 17.</b> <i>Compensación coordenada X de cada figura</i> .....	65
<b>Tabla 18.</b> <i>Distancia adecuada entre piezas</i> .....	66
<b>Tabla 19.</b> <i>Pruebas del sistema completo (clasificación de piezas y seguridad activa).</i> .....	68
<b>Tabla 20.</b> <i>Datos chi-cuadrado hipótesis</i> .....	70
<b>Tabla 21.</b> <i>Talento humano.</i> .....	72
<b>Tabla 22.</b> <i>Materiales e insumos.</i> .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Partes del Mitsubishi MELFA RV – 2SDB. ....	11
<b>Figura 2.</b> Eslabones y juntas del Mitsubishi MELFA RV – 2SDB.....	12
<b>Figura 3.</b> Dimensiones del brazo robótico RV – 2SBD .....	13
<b>Figura 4.</b> Gripper de presión mecánico paralelo. ....	21
<b>Figura 5.</b> Herramientas adaptadas al brazo robótico. a) Herramienta para soldadura por arco. b) Herramienta para amolar. ....	22
<b>Figura 6.</b> Gripper mecánico adaptativo. ....	22
<b>Figura 7.</b> a) Banda transportadora con rodillos. b) Banda transportadora plana hueca. ....	23
<b>Figura 8.</b> Componentes principales de una banda transportadora. ....	24
<b>Figura 9.</b> Cuerpo del gripper adaptativo. ....	30
<b>Figura 10.</b> Partes del gripper. a) Acople de garras. b) Garra. ....	30
<b>Figura 11.</b> Ensamble gripper adaptativo. ....	31
<b>Figura 12.</b> Micro actuador lineal PQ12. ....	32
<b>Figura 13.</b> Armazón de la banda transportador. ....	33
<b>Figura 14.</b> Partes del Armazón de la banda transportadora. a) Soporte b) Tensor .....	33
<b>Figura 15.</b> Rodillos. a) Rodillo Motriz. b) Rodillo Tensor. ....	34
<b>Figura 16.</b> Ensamble de la banda transportadora. ....	34
<b>Figura 17.</b> Motor con caja reductora CNBTR. ....	36
<b>Figura 18.</b> Rodillo Motriz. ....	37
<b>Figura 19.</b> Rodillo Tensor. ....	38
<b>Figura 20.</b> Rodamientos de 9 mm de diámetro externo. ....	39
<b>Figura 21.</b> Cámara Web Logitech C920 HD. ....	40
<b>Figura 22.</b> Logo OpenCV. ....	41
<b>Figura 23.</b> Matllab. ....	43
<b>Figura 24.</b> Figuras geométricas. ....	43
<b>Figura 25.</b> Conexión de componentes físicos. ....	44
<b>Figura 26.</b> Etapas y flujo de información de sistema. ....	45
<b>Figura 27.</b> Campo visual de las cámaras. ....	46

<b>Figura 28.</b> Posición de las figuras.....	46
<b>Figura 29.</b> Punto centro. ....	47
<b>Figura 30.</b> Posicionamiento del brazo robótico con respecto a la banda.....	47
<b>Figura 31.</b> Inicio de servidor.....	49
<b>Figura 32.</b> Selección de pieza a clasificar.....	50
<b>Figura 33.</b> Declaración de la dirección IP y puerto del Robot. ....	51
<b>Figura 34.</b> Apertura y cierre de comunicación en Matlab.....	51
<b>Figura 35.</b> Relación del Angulo de visión respecto a la distancia focal.....	53
<b>Figura 36.</b> Área de detección de la cámara de clasificación .....	54
<b>Figura 37.</b> Área de detección útil de cámara de seguridad.....	55
<b>Figura 38.</b> Campo visual de detección.....	56
<b>Figura 39.</b> Muestra de imágenes cámara de seguridad.....	57
<b>Figura 40.</b> Formas de figuras geométricas .....	58
<b>Figura 41.</b> Clasificación de triángulos .....	59
<b>Figura 42.</b> Clasificación de cuadrados .....	60
<b>Figura 43.</b> Clasificación de pentágonos .....	62
<b>Figura 44.</b> Posicionamiento del brazo robótico sobre cada figura geométrica ....	63
<b>Figura 45.</b> Posicionamiento compensado en X.....	65
<b>Figura 46.</b> Distancia adecuada entre piezas.....	67
<b>Figura 47.</b> Tabla del chi-cuadrado 2GDL y 5% error .....	70

## RESUMEN

Este trabajo de titulación presenta el diseño e implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico MELFA RV - 2SDB, mediante el uso de visión artificial para generación de trayectorias reconfigurables y la incorporación de un sistema de seguridad activa, el cual permitirá que al tener un objeto presente en la banda transportadora el sistema de reconocimiento de objetos por forma lo reconozca y active al manipulador robótico, lo posicione en el lugar donde se encuentra el objeto y lo paletice al lugar correspondiente. El funcionamiento de esta celda de clasificación se efectuó a través de una banda transportadora, junto con un gripper adaptativo, es decir que se adapta a la forma del objeto a sujetar, la apertura y cierre del gripper se lo realiza con la ayuda de un micro servo lineal PQ12. La seguridad activa de esta aplicación está basada en la detección de personas dentro de un área de trabajo, haciendo que el lugar sea seguro para el trabajo en conjunto entre el robot y operador, previniendo los accidentes por golpes directos del manipulador, ya que este se detendrá al detectar una persona al momento de estar del área de trabajo

### **PALABRAS CLAVE:**

- **MELFA RV – 2SDB**
- **TRAYECTORIA RECONFIGURABLE**
- **RECONOCIMIENTO DE OBJETOS**
- **SEGURIDAD ACTIVA**

## **ABSTRACT**

This degree work shows the design assisted sorting line, it makes by robotic manipulator MELFA RV - 2SDB, using artificial vision for generation of reconfigurable trajectories and incorporation of an active security system, that allow having an object on the conveyor belt, the object recognition system by form recognize and turn the robotic manipulator on, assign it in the place where the object is and palletize to the corresponding place. The functioning of this classification cell was effected on a belt conveyor, with adaptive gripper, it means that adapts as the form of the object to be fastened, opening and closing of the gripper is realized by the help of a linear servo micro PQ12. Active security of this application is based on the detection of people within a work area, making a safe place for the work between robot and operator, preventing accidents by direct hits of the manipulator, therefore it will be stopped when a person is detected in the area of work

### **KEYS WORD:**

- **MELFA RV – 2SDB**
- **RECONFIGURABLE TRAJECTORY**
- **OBJECT RECOGNITION**
- **ACTIVE SECURITY**

## **CAPÍTULO I**

### **1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Introducción**

Con el transcurso del tiempo se han perfeccionado sistemas y equipos que permiten facilitar las actividades diarias o especializadas que realiza el ser humano. Por esto se ha ido innovando en el área de automatización; en la cual uno de los principales elementos que se emplean son los brazos robóticos debido a su gran exactitud y precisión, lo que les permite ser utilizados en gran variedad de aplicaciones.

También se usa visión artificial, la cual está en continuo perfeccionamiento y se encuentra con alto grado de uso en países con mayor desarrollo tecnológico, pero en el Ecuador esta área es poco explorada, por ello se propone este proyecto tecnológico mediante el diseño y elaboración de un sistema robotizado de clasificación y posicionamiento de objetos de un sistema de transporte, mediante trayectorias reconfigurables con el uso de visión artificial.

Con este proyecto se espera asimilar y crear nuevos conocimientos aplicados en esta rama de la investigación científica, así como un aporte para futuras investigaciones en el área robótica de manufactura.

#### **1.2. Antecedentes**

En los últimos años la automatización de las líneas de producción ha alcanzado todas las ramas industriales existentes; siendo así el caso de la introducción de robots industriales su mayor representante. Los robots tienden a realizar actividades humanas, tales como caminar, tomar objetos y tomar decisiones en diversas circunstancias, mostrando nuevas habilidades y dotados de cierto nivel de inteligencia artificial.

Según estadísticas de la International Federation of Robotics (IFR) en su World Robotics Report, se estima que para el año 2019 estén operativos más de 2.6 millones de unidades robóticas a nivel mundial. (Seitz, 2017)

Además, la estrategia de cambio de la matriz productiva en el Ecuador tiene como columna vertebral el conocimiento, la innovación, la ciencia y la tecnología. (Telégrafo, 2014)

Por tanto, la industria necesita un cambio continuo para seguir creciendo, actualizando sus procesos internos y acoplándose a nuevas necesidades de los mercados; que mejor manera que promover el desarrollo de nuestro país, desarrollando procesos automatizados que garanticen tareas repetitivas, con precisión, más rápidos, con menor errores y la baja de los costos de producción.

En las universidades del país se han desarrollado proyectos de investigación de procesos industriales.

**Título:** “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PARA SUPERVISAR UN PROCESO INDUSTRIAL EN EL LABORATORIO DE HIDRÓNICA Y NEURÓNICA”.

**Autor:** Mayra Jaramillo Murrieta

**Universidad:** Universidad de las Fuerzas Armadas extensión, Latacunga.

**Fecha de Publicación:** 2015.

**Título:** “BRAZO ROBÓTICO PARA EL RECONOCIMIENTO Y MANIPULACIÓN DE OBJETOS, CONTROLADO MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL”.

**Autor:** Nelson David de la Rosa Mejillón

**Universidad:** Universidad Estatal Península de Santa Elena, Santa Elena.

**Fecha de Publicación:** 2014.

### **1.3. Planteamiento del problema**

La tecnología avanza a pasos agigantados, incorporando cada vez equipos autónomos e inteligentes, siendo una característica favorable cuando se cuenta con

los recursos para actualizar la línea de producción, pero se convierte en un problema cuando no se dispone de estas facilidades.

También se genera una inconformidad al utilizar equipos “desactualizados” y carentes de mejoras tecnológicas, pasando a considerarles deficientes, aunque estén totalmente funcionales y operativos.

La necesidad radica en poder implementar una línea robotizada de clasificación y posicionamiento con un manipulador donde este sea capaz de cambiar la trayectoria en función de referencias visuales con el fin de tomar el objeto siempre correctamente y pueda organizarlos en contenedores, actualmente solo los robots industriales más sofisticados incorporan estos recursos tecnológicos, pero no todos estos recursos son suficientes cuando se trata de realizar una nueva tarea ya que se necesita una actualización de software para realizar dichas tareas, teniendo también presente la seguridad del operador.

En el mercado industrial son muy pocas las soluciones ofertadas para sistemas genéricos o multimarca, pues generalmente los integradores de cada empresa de robótica desarrollan soluciones propietarias que venden como paquetes para cada tipo de robot, dejando al margen a clientes que no pueden acceder a todo el catálogo de soluciones brindadas por el fabricante.

Existen muy pocos desarrolladores en cuanto a la aplicación de técnicas de visión artificial para resolver problemas como el expuesto, por lo cual demandará tiempo de investigación, desarrollo e implementación robusta, capaz de mitigar en cuanto sean posible los cambios de iluminación presentes en cualquier proceso industrial.

Los desafíos se encuentran en identificar la orientación y posición de las piezas a ser clasificadas para que el efector final tenga la orientación adecuada y sea capaz de tomar la pieza de forma correcta, también a la par se trabajará en un sistema de seguridad activa donde identificará personas para evitar que el manipulador golpee al operador humano, todo esto se lo realizará controlando los eslabones del manipulador en tiempo real.

Al tener varios programas inmersos para poder realizar esta aplicación, es menester definir un correcto canal de comunicación entre todos los componentes del sistema, para que no exista una pérdida de datos mientras se realiza el procesamiento de imágenes y por ende del control.

#### **1.4. Descripción resumida del proyecto**

El presente trabajo se enfoca en implementar un sistema de clasificación y posicionamiento de objetos, usando herramientas como: visión artificial la cual será capaz de identificar la posición de los objetos en un sistema de transporte y adapte la localización del efector final para tomar el objeto de tal forma que los coloque en contenedores obedeciendo una trayectoria reconfigurable según el orden y los tipos de objetos que se estén clasificando, teniendo así una aplicación pick and place. Al mismo tiempo, el sistema de visión artificial alertará al manipulador de la cercanía de un operador humano, para que el sistema se detenga totalmente, dependiendo de la cercanía de la persona, constituyéndose como un sistema de seguridad activa al evitar que ocurra un accidente.

El sistema de visión artificial involucrará algoritmos de reconocimiento de objetos que asistirán en la obtención de la posición y orientación de los mismos en el sistema de transporte, así como clasificadores pre – entrenados especializados en el reconocimiento de personas, para evitar cualquier choque con el brazo robótico; se analizarán las características del objeto generando un área de seguridad alrededor del operador, la cual representaría una distancia prudente para que los movimientos del robot no representen una amenaza al operario. Adicionalmente, este clasificador debe reconocer al brazo robótico como tal, para evaluar posibles interacciones entre los dos actores dentro del espacio de trabajo. Para seguridad del operador humano se plantea que el sistema debe ser capaz de generar señales de aviso que notifiquen a la persona que se encuentra interrumpiendo la trayectoria del robot, consiguiendo de esta manera un sistema capaz de brindar seguridad tanto al robot como al ser humano.

En resumen, para el desarrollo del proyecto se deberá investigar sistemas de visión artificial capaces de operar en condiciones lumínicas cambiantes, semejantes

a las de una planta de producción, entender y modelar la cinemática del manipulador robótico MELFA RV – 2SDB, para generar trayectorias reconfigurables de la aplicación de clasificación y posicionamiento de objetos, como también implica el diseño de un gripper con el que se puedan sujetar objetos de distintas formas, considerando que estos objetos no deben ser muy grandes.

### **1.5. Justificación e importancia**

Las líneas robotizadas de clasificación y posicionamiento con un manipulador robótico, que se están utilizando actualmente se encuentran dotadas de diferentes tipos de sensores que las hacen confiables al momento de trabajar con ellas.

Desde la implementación de líneas automatizadas, todas estas han sido implementadas para que realicen una sola actividad o secuencia, pero al momento de realizar un cambio se necesita una actualización de todo el sistema teniendo presente gastos económicos, o compra de nuevos paquetes para poder resolver este problema, teniendo presente que se debe saber si hay un desarrollo para el manipulador robótico de la línea de automatización, que sea capaz de cumplir las nuevas necesidades.

Por estos motivos se busca una solución alternativa, con el uso de visión artificial para lograr generar nuevas trayectorias que se configuren de manera autónoma y se adecuen para cubrir nuevas necesidades, haciendo que el gasto disminuya considerablemente, al no tener que implementar nuevos componentes o actualizaciones; el uso de visión artificial en la industria es una herramienta que ayuda a cubrir diferentes requerimientos debido a que con el procesamiento de imágenes se puede obtener puntos de referencia, para realizar controles, y no obstante realizar un control que priorice la seguridad del operador.

En Ecuador, la cantidad de industrias que utilizan sistemas robóticos en sus líneas de producción está en aumento, debido a las grandes capacidades que han demostrado estos sistemas, pero se precisa una interacción entre hombre máquina para intentar disminuir el peligro de algún accidente.

Por lo expuesto anteriormente, este proyecto busca ofrecer una solución de bajo costo para líneas robóticas de clasificación y posicionamiento que cuenten con un manipulador robótico, realizando una aplicación que incorpore visión artificial para generar trayectorias reconfigurables de acuerdo a la posición de los objetos a manipular, y un sistema de seguridad para los operarios humanos y que permita el trabajo conjunto entre personas y robots en ambientes industriales, sin exponerlos a riesgos.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo General**

- Investigar, diseñar e implementar una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico MELFA RV – 2SBD, mediante el uso de visión artificial para generar trayectorias reconfigurables e incorporar un sistema de seguridad activa.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

- Recolectar, analizar y sintetizar la mayor cantidad de información referente al estado del arte del sistema.
- Establecer e implementar un canal de comunicación eficiente entre los componentes del sistema.
- Modelar matemáticamente el manipulador robótico para establecer trayectorias de colocación y posicionamiento adecuado de objetos, en base a las referencias dadas por el algoritmo de visión artificial.
- Diseñar un algoritmo de reconocimiento de objetos, capaz de entregar los datos de posición y orientación de objetos en movimiento sobre un sistema de transporte.

- Diseñar e implementar el sistema de transporte (banda transportadora) y efector final (gripper) para sujetar figuras geométricas.
- Desarrollar el sistema de visión artificial que proporcione las referencias para el sistema de seguridad activa en entornos industriales y que brinde seguridad al operador.
- Integrar todos componentes y subsistemas que conforman el sistema final.
- Realizar pruebas de funcionamiento y validación de hipótesis.
- Enlistar las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del sistema.

### 1.7. Hipótesis

¿Es posible diseñar e implementar una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico, mediante visión artificial para generar trayectorias reconfigurables de posición y orientación en función de la ubicación del objeto, así como salvaguardar la seguridad del operador?

### 1.8. Variables de investigación

- **Variable Independiente:** Línea de clasificación asistida por un manipulador robótico MELFA RV – 2SDB mediante el uso de visión artificial.
- **Variable Dependiente:** Reconocimiento y clasificación de objetos.
- **Conceptualización de la Variable Independiente:** Línea de clasificación asistida por un manipulador robótico MELFA RV – 2SDB mediante el uso de visión artificial permitirá al operario realizar tareas reconocimiento y clasificación de objetos por su forma de manera automática y con generación de trayectorias reconfigurables según donde se encuentre el objeto en la banda transportadora. Como un valor agregado tiene un

sistema de seguridad activa mediante la identificación de personas para evitar que el manipulador golpee al operador humano.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Manipuladores robóticos industriales

Según la definición de la “International Federation of Robotics (IRF)”, se entiende por robot industrial de manipulación a una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de diversos trabajos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento. (Gonzales, 2012)

##### 2.1.1. Brazo robótico Mitsubishi MELFA RV – 2SDB

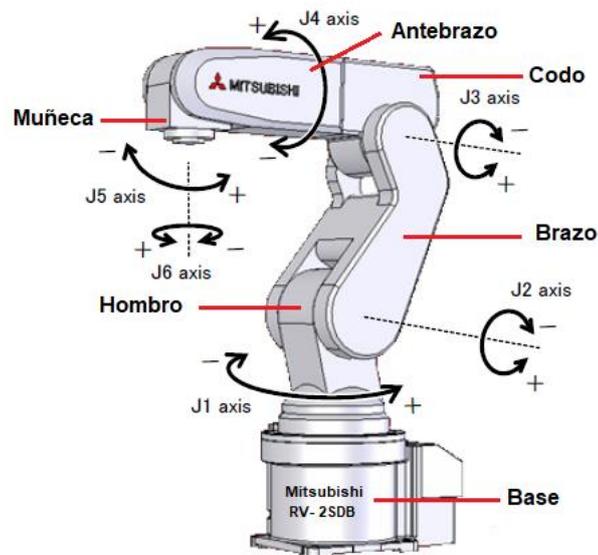
El MELFA RV - 2SDB de Mitsubishi Electric es un robot de alta velocidad, multifuncional, con una capacidad de carga máxima de 3 kg y tiempos de ciclo de tan sólo 0,6 segundos. Es un brazo articulado multiejes vertical que puede aportar una mejora significativa de la producción en células de montaje y fabricación para una amplia variedad de industrias, con desplazamientos más rápidos y características únicas de diseño que mejoran los tiempos de ciclo. (Bulletin, 2010)

Este manipulador posee base, hombro, codo y muñeca, además incorpora 6 servomotores de corriente alterna trifásica, para asegurar la precisión del efector final, utiliza encoders absolutos, posee excelentes características que lo hacen uno de los robots industriales con sobresalientes prestaciones en el mercado. (Mitsubishi Electrical, El libro de la automatización, 2017, pág. 161)

Las características técnicas del manipulador robótico se describen en la tabla 1, y sus articulaciones se visualizan en la figura 1.

**Tabla 1.***Datos técnicos del brazo Mitsubishi MELFA RV- 2SDB.*

DETALLE		CARACTERÍSTICAS
Modelo		RV – 2SDB
Controlador		CR1D
Grados de Libertad		6
Tipo Constructivo		Brazo Articulado Vertical
Sistema de Accionamiento		Servo AC (Frenado en todos los ejes)
Detección de Posición		Encoder de valor absoluto
Carga Útil	Valor Nominal	2kg
	Valor Máximo	3 kg (Muñeca hacia abajo)
Longitud del Brazo Máximo		230 + 270 mm
Alcance Radial Máximo		504 mm
Rango de Operación (Grados)	J1	480 (- 240; + 240)
	J2	240 (- 120; + 120)
	J3	160 (- 0; + 160)
	J4	400 (- 200; + 200)
	J5	240 (- 120; + 120)
	J6	720 (- 360; + 360)
Velocidad Máxima		4400 mm / s
Tiempo de Ciclo		0.6 s
Repetitividad		± 0.02 mm
Peso		19 kg
Clase de Protección		IP30
Montaje		Puede montarse en suelos, paredes o techos.



**Figura 1.** Partes del Mitsubishi MELFA RV – 2SDB.

Fuente: (Mitsubishi Electrical, El libro de la automatización, 2017)

### 2.1.2. Grados de libertad del manipulador robótico

Los grados de libertad del brazo robótico son la cantidad de movimientos independientes que determinan la última posición a la que puede llegar el efector final del mecanismo como un gripper. Según el criterio de Kutzbach y Grübler, para el cálculo de los grados de libertad de un mecanismo en 3 dimensiones (X Y Z), se lo hace mediante la ecuación 1. (Cardona & Clos, 2011)

$$GDL = 6(n - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 - 2J_4 - J_5 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$n$  = Número de eslabones del mecanismo

$J_1$  = Uniones de 1 grado de libertad

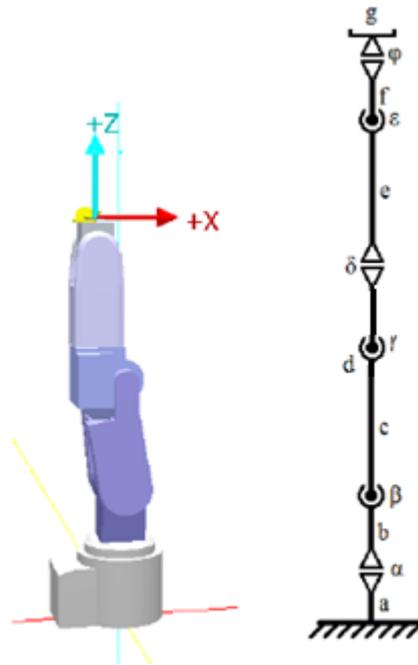
$J_2$  = Uniones de 2 grados de libertad

$J_3$  = Uniones de 3 grados de libertad

$J_4$  = Uniones de 4 grados de libertad

$J_5$  = Uniones de 5 grados de libertad

Para calcular los grados de libertad del manipulador se debe primero determinar el número de eslabones y juntas como se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Eslabones y juntas del Mitsubishi MELFA RV – 2SDB.

Fuente: (Pacun & Jadlovský, 2015)

Según la ecuación 1., el robot Mitsubishi RV – 2SDB posee:  $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$  pares cinemáticos de revolución de 1 grado de libertad y 6 eslabones. Por tanto, este manipulador robótico posee 6 grados de libertad.

$$GDL = 6 (7 - 1) - 5(6)$$

$$GDL = 6 (6) - 30$$

$$GDL = 36 - 30$$

$$\mathbf{GDL = 6}$$

## 2.2. Modelamientos matemáticos de manipuladores robóticos

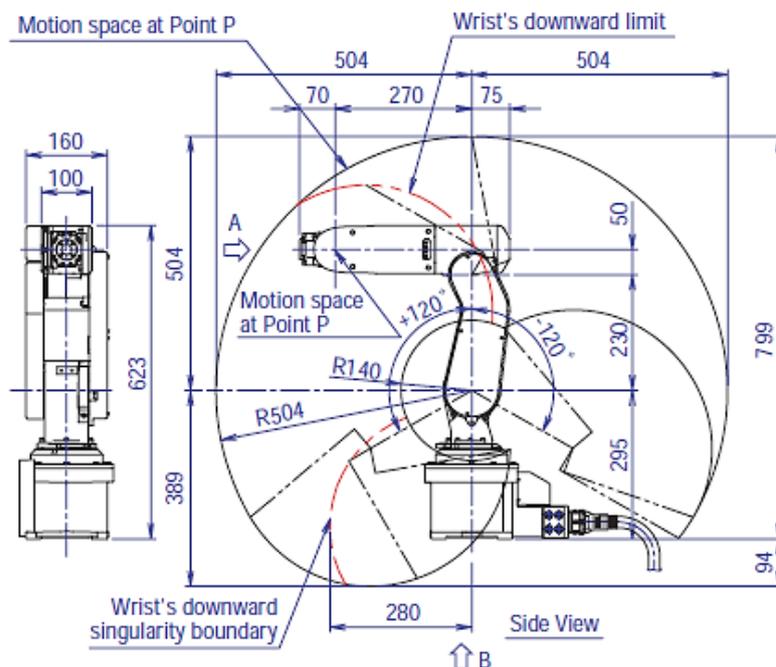
Se examina el modelo matemático del brazo robótico MELFA RV - 2SDB, que consiste en la cinemática directa e inversa.

### 2.2.1. Modelo cinemático directo

En este modelo se determina a qué punto llegará el último eslabón del brazo a partir del movimiento de cada junta, para el desarrollo de estos cálculos existen varios métodos matemáticos, en este trabajo se utiliza el modelo de Denavit Hartenberg versión Standard. (Ollero, 2001)

- $\theta$ : ángulo de rotación en el eje Z, medido desde el eje X anterior al eje X actual.
- $d$ : distancia a lo largo del eje Z, medida desde el eje X anterior al eje X actual.
- $a$ : distancia a lo largo del eje X, medida desde el eje Z anterior al Z actual.
- $\alpha$ : ángulo de rotación en el eje X, medido desde el eje Z anterior al Z actual.

En la figura 3., se muestra las dimensiones que posee el brazo robótico, las que son necesarias para el cálculo de los parámetros Denavit Hartenberg.



**Figura 3.** Dimensiones del brazo robótico  
MELFA RV – 2SBD

En la tabla 2., se muestra los parámetros de Denavit Hartenberg obtenidos del brazo Mitsubishi RV – 2SDB, para el cálculo de la cinemática directa.

**Tabla 2.**

*Parámetros D – H del Mitsubishi RV – 2SDB.*

$J$	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
<b>1</b>	$\theta_1$	295	0	<b>90°</b>
<b>2</b>	$\theta_2 + 90^\circ$	0	230	<b>0</b>
<b>3</b>	$\theta_3 - 90^\circ$	0	0	<b>-90°</b>
<b>4</b>	$\theta_4$	270	0	<b>90°</b>
<b>5</b>	$\theta_5$	0	0	<b>-90°</b>
<b>6</b>	$\theta_6$	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

A continuación, se calculan las matrices de transformación homogéneas con la matriz representada en la ecuación 2., considerando que en el proceso se utiliza  $\theta_2$  y  $\theta_3$  simples y al final se restaran los valores de 90°.

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2}$$

Para la articulación o junta número uno se tiene la matriz de la ecuación 3.

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.295 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3}$$

Para la articulación o junta número dos se tiene la matriz de la ecuación 4.

$${}^1_2A = \begin{bmatrix} -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & -0.125 \sin\theta_2 \\ \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0.125 \cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para la articulación o junta número tres se tiene la matriz de la ecuación 5.

$${}^2_3A = \begin{bmatrix} \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & 0 \\ -\cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 5}$$

Para la articulación o junta número cuatro se tiene la matriz de la ecuación 6.

$${}^3_4A = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para la articulación o junta número cinco se tiene la matriz de la ecuación 7.

$${}^4_5A = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 7}$$

Para la articulación o junta número seis se tiene la matriz de la ecuación 8.

$${}^5_6A = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 8}$$

La matriz de transformación homogénea se logra con la ecuación 9.

$$A_6^0 = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 * A_4^3 * A_5^4 * A_6^5 \quad \text{Ecuación 9}$$

Reemplazando las ecuaciones resultantes de cada una de las articulaciones, se obtiene la ecuación 10.

$${}^0_6A = \begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 & d1 \\ a2 & b2 & c2 & d2 \\ a3 & b3 & c3 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$${}^0_6A = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.95 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & -0.125\sin\theta_2 \\ \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0.125\cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & 0 \\ -\cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a1 &= \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) \\ &* (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * (\sin(\theta_6)) - \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) \\ &* \cos(\theta_6) + \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_4) \\ &* (\cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) - \cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6))) + \sin(\theta_1) * (-\cos(\theta_4) \\ &* \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b1 &= \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * (-\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)) \\ &+ \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_3) \\ &* (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * (\cos(\theta_6)))) + (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\ &+ \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_6)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c1 &= \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (-\cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \sin(\theta_3) * \cos(\theta_5)) + \sin(\theta_2) \\ &* (\sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \cos(\theta_3) * \cos(\theta_5))) + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\ &* \sin(\theta_5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d1 &= \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (\sin(\theta_3) \\ &* (-0.34 * \cos(\theta_3) - 0.23) - 0.34 * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_2) \\ &* (\cos(\theta_3) * (-0.34\cos(\theta_5) - 0.23) + 0.34\sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - 0.125)) \\ &+ 0.34\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a2 = & \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_1) * (\cos(\theta_2) \\
& * (\cos(\theta_3) * (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_6) - \sin(\theta_4)) \\
& * (\sin(\theta_6) - \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_2) \\
& * (\sin(\theta_3) * (\sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) - \cos(\theta_3) \\
& * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b2 = & \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) \\
& - (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6) + \sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) \\
& * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c2 = & \sin(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (-\cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \sin(\theta_3) * \cos(\theta_5)) + \sin(\theta_2) \\
& * (\sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \cos(\theta_3) * \cos(\theta_5))) - \cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\
& * \sin(\theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d2 = & \sin(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) * (-0.34 \cos(\theta_5) - 0.23) - 0.34 * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) \\
& * \sin(\theta_5)) * \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_2) * \cos(\theta_3) * (-0.34 * \cos(\theta_5) - 0.23) \\
& + 0.34 \sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - 0.1259 - 0.34 \cos(\theta_4) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a3 = & \cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * \sin(\theta_5)) * \cos(\theta_6) \\
& + (\sin(\theta_3) * (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6))) + \sin(\theta_2) \\
& * (\cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_3) * \sin(\theta_3) \\
& * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b3 = & \cos(\theta_2) * (\sin(\theta_3) - (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)) - \cos(\theta_3) \\
& * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6)) + \sin(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * (-\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) \\
& - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c3 = & \cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * (\cos(\theta_5) - \sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_2) * (-\cos(\theta_3) \\
& * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \sin(\theta_3) * \cos(\theta_5))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d3 = & \cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * 0.34 * \cos(\theta_5) + 0.23 - 0.34 \sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) + \\
& 0.125) + \sin(\theta_2) * (\sin(\theta_3) * (-0.34 * \cos(\theta_5) - 0.23) - 0.34 * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5)) + \\
& 0.295000000000001
\end{aligned}$$

Mediante la ecuación 11, se relaciona el punto de origen con el punto final a través de las ecuaciones anteriores.

$$P = {}^0_6A * P_0 \quad \text{Ecuación 11}$$

El punto inicial de todos los sistemas de coordenadas es:  $X_0 = 0; Y_0 = 0; Z_0 = 0$ ; por lo tanto, se consigue la ecuación 12 y utilizando la equivalencia de la ecuación 10 se obtiene la ecuación 13.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0_6A * \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & b1 & c1 & d1 \\ a2 & b2 & c2 & d2 \\ a3 & b3 & c3 & d3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 13}$$

Resolviendo la ecuación 13 para X, Y, Z se tiene:

$$\begin{aligned} X = & \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6)) \\ & - \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_2) * (\sin(\theta_3) * (\sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) \\ & - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) - \cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6))) + \sin(\theta_1) \\ & * (-\cos(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)), \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) \\ & * (\cos(\theta_3) * (-\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_3) \\ & * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6)) + \sin(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_3) * (\cos(\theta_4) \\ & * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)))) + \sin(\theta_1) * (\sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) \\ & * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_4) * \cos(\theta_6)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y = & \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (-\cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \sin(\theta_3) * \cos(\theta_5)) + \sin(\theta_2) \\ & * (\sin(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - \cos(\theta_3) * \cos(\theta_5))) + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\ & * \sin(\theta_5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z = & \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_3) * (\sin(\theta_3) * (-0.34 * \cos(\theta_5) - 0.23) - 0.34 * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) \\
& * \sin(\theta_5)) + \sin(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * (-0.34 * \cos(\theta_5) - 0.23) + 0.34 * \sin(\theta_3) \\
& * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - 0.125)) + 0.34 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_5)] [\cos(\theta_1) \\
& * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_1) * (\cos(\theta_2) \\
& * (\cos(\theta_3) * (\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6)) - \sin(\theta_3) \\
& * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_2) * (\sin(\theta_3) * (\sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_4) \\
& * \cos(\theta_5) * \cos(\theta_6)) - \cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \cos(\theta_6))), \cos(\theta_1) * (\cos(\theta_4) \\
& * \cos(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6)) + \sin(\theta_1) * (\cos(\theta_2) * (\cos(\theta_3) \\
& * (-\cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) - \sin(\theta_4) * \cos(\theta_6)) + \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) \\
& * \sin(\theta_6)) + \sin(\theta_2) * (\cos(\theta_3) * \sin(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_3) * (\cos(\theta_4) \\
& * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_6) + \sin(\theta_4) * \theta_2
\end{aligned}$$

$${}^0_6A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.99 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2.2.2. Modelo cinemático inverso

Este modelo determina el valor que deben moverse las articulaciones o juntas para llegar a un punto requerido por la aplicación o el usuario.

En la cinemática inversa se conoce la posición y orientación del efector final, pero se desconocen las variables articulares, por tanto, este modelo es fuertemente dependiente de la configuración del robot. Se necesita de la resolución de un conjunto de ecuaciones no lineales, de manera que se implementen diferentes métodos numéricos para llevar a cabo este cometido.

Las soluciones al problema cinemático inverso consisten en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot  $q = [q_1, q_2 \dots \dots q_n]$  para que su extremo se posiciones y oriente según una determinada configuración. En general no existe una solución única para este problema, incluso puede no existir.

La resolución de este problema puede dar lugar a múltiples soluciones (diferentes configuraciones articulares con las que obtener la misma configuración del efector

final), puede que no exista solución (por ejemplo, en una posición no alcanzable), o puede dar lugar a singularidades. **Fuente especificada no válida.**

Los métodos usados para la solución de la cinemática inversa son:

**Método geométrico.** Este procedimiento es adecuado para pocos grados de libertad y se basa en encontrar suficientes relaciones geométrías en las que intervendrán las coordenadas del efector final del robot y sus coordenadas articulares.

**Desacoplo cinemático.** Consiste en la separación de orientación y posición, se utiliza en robots de 6 GDL.

El método del desacoplo cinemático separa ambos problemas, es decir de posición y orientación. Así, dada una posición y orientación final deseada se establece la posición la muñeca del robot, calculando los valores de  $q_1, q_2$  y  $q_3$  y de manera independiente se consideran  $q_4, q_5$  y  $q_6$ .

## 2.3. Efectores finales

Un robot destinado a realizar tareas multifuncionales necesariamente requiere de herramientas apropiadas o también llamados efectores finales que pueden ser simples o complejos. Existe variedad de diseños de efectores finales, pero básicamente son dispositivos ubicados en el extremo de un brazo robótico y diseñado para interactuar con el medio ambiente, al desarrollar una tarea fácil o especializada. (Ramirez, 2003)

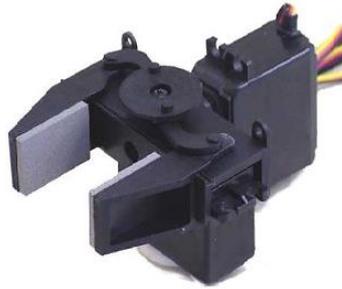
La naturaleza exacta de este dispositivo depende de la aplicación del robot, por lo que tiene mecanismos que permiten abrir y cerrar con características idóneas para tomar piezas.

### 2.3.1. Clasificación de efectores finales

Dado que los efectores finales permiten a los robots realizar diversas tareas; se puede encontrar una gran variedad de estos dispositivos que permiten agarrar, sostener, levantar, transportar, cortar, perforar, soldar y pintar piezas de trabajo con

precisión. Los efectores finales principalmente se dividen en dos categorías tenazas y herramientas. (Ramirez, 2003)

**Tenaza (Gripper).** Dispositivo que se utiliza para sujetar o liberar una pieza u objeto mientras se ejecuta el ciclo de trabajo del brazo robótico.



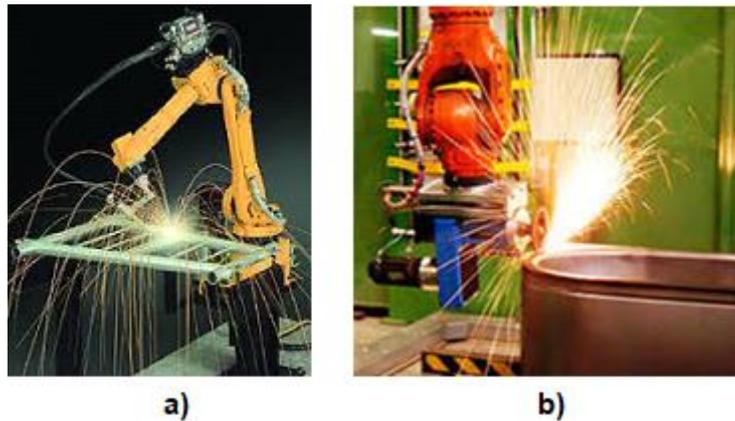
**Figura 4.** Gripper de presión mecánico paralelo.

De acuerdo con el sistema de sujeción se clasifican:

- Gripper de presión mecánico, puede ser angular o paralelo.
- Gripper de vacío, usa ventosas de succión hechas de caucho.
- Gripper con dispositivo magnético, usa electroimán.

**Herramientas.** Dispositivos usados en aplicaciones complejas en las que el brazo robótico realiza operaciones en la pieza de trabajo, como se muestra en la figura 5.

CONTINUA



**Figura 5.** Herramientas adaptadas al brazo robótico.

a) Herramienta para soldadura por arco.

b) Herramienta para amolar.

Las herramientas son incorporadas al brazo robótico para realizar procesos especiales, entre las herramientas más usuales tenemos: taladros, pinza soldadora por puntos, soplete de soldadura por arco, rociadores de pintura, fresa o lija, etc.

### 2.3.2. Gripper de presión mecánica

Este tipo de gripper está compuesto por mecanismos de accionamiento mecánico que simulan dedos para agarrar el objeto, siendo la fuerza de agarre por contacto o fricción mecánica. (Carranza A., 2015)



**Figura 6.** Gripper mecánico adaptativo.

Fuente: (Festo, 2017)

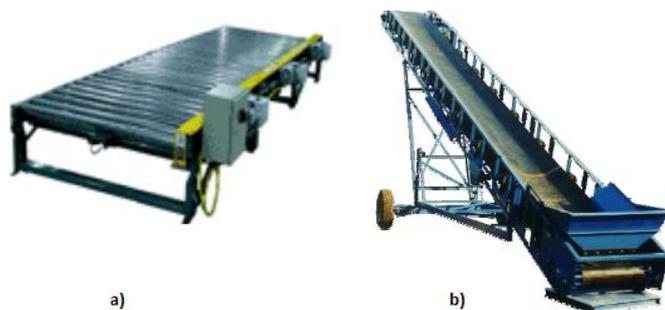
Los más comunes son angulares y paralelos, que puede realizar agarres externos o internos. Actualmente se cuenta con el gripper adaptativo que simula la acción de los dedos y permite sujetar piezas cúbicas, esféricas y rectangulares fácilmente ya que se adapta a la forma del objeto.

## 2.4. Bandas transportadoras

Se usan como componentes en la distribución, almacenaje automatizado y uno de los sistemas de transporte continuo más utilizados en la industria, tanto para el transporte de cargas aisladas o bultos, como para materiales a granel. El procedimiento consiste en una cinta sin fin más o menos flexible, accionada por un motor, sobre la que se transportan las cargas tanto horizontalmente como con cierta inclinación.

### 2.4.1. Tipos de bandas transportadoras

Las bandas transportadoras son fabricadas de acuerdo con especificaciones y respecto al tipo de material o productos a transportar, etc. En la figura 7, se indica una de las clasificaciones más comunes.



**Figura 7.** a) Banda transportadora con rodillos. b) Banda transportadora plana hueca.

**Banda transportadora con rodillos.** Una de las más comunes que usa para su funcionamiento tubos ubicados perpendicularmente.

**Banda transportadora con ruedas.** Son similares a las anteriores solo que en este caso no cuenta con rodillos sino con ruedas pequeñas. Su uso está condicionado a cargas más ligeras.

**Banda transportadora plana.** Estas se encuentran en dos clases, la primera es la banda plana para piezas y la segunda es la banda hueca usada para material en masa.

#### 2.4.2. Componentes de las bandas transportadoras

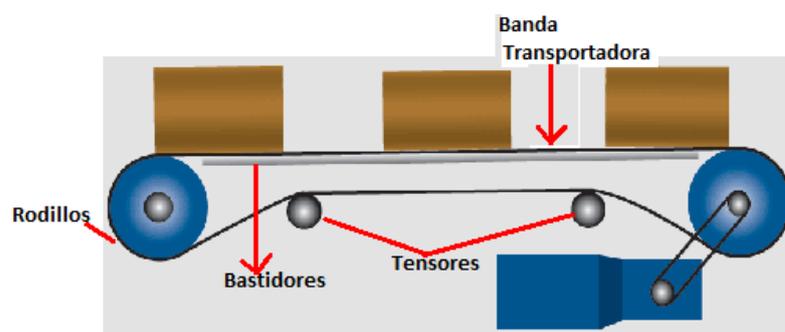
Las bandas transportadoras de acuerdo con sus diseños pueden contener varios componentes, entre los más principales se encuentran:

**Bandas transportadoras.** Son las que soportan los objetos y las cuales permiten su transporte. Estas se encuentran de varias clases, considerando su tipo de tejido, disposición y aspecto.

**Rodillos y soportes.** En las cintas transportadoras los rodillos son fundamentales ya que gracias a ellos el sistema se activa, debido al giro de estos. Los rodillos tienen la función de soporte y centrado.

**Tensores.** Estos dispositivos son esenciales también en el equipo pues permiten que el contacto entre banda y tambor de acción sea el adecuado. Así mismo evita que los objetos se derramen por los costados y mantienen la tensión en el ramal.

**Bastidores.** Dan el soporte necesario a la banda y por ende soportan también a los rodillos y el material.



**Figura 8.** Componentes principales de una banda transportadora.

### 2.4.3. Características

Las bandas transportadoras se diferencian unas de otras por su tipo, sin embargo, entre ellas comparten ciertas características, las cuales se detallan a continuación:

- Normalmente funcionan de manera mecanizada y en muchas ocasiones hasta automatizada.
- Se establecen rutas dentro de los procesos de transporte, por lo cual estas se ubican en sitios fijos, pero evidentemente pueden cambiarse.
- Las bandas transportadoras generalmente se ubican sobre el suelo, pero también pueden posicionarse inclinadas o suspendidas.
- Los sistemas de transporte manejan un flujo fijo y en una sola dirección de cargas que pueden ser discretas o también voluminosas. (Proymec, 2014)

### 2.5. Visión artificial en celdas robotizadas

La visión artificial aplicada a la industria abarca a las ramas de la informática, la ingeniería mecánica y la automatización industrial. En una celda de manufactura flexible su función es la de realizar inspecciones en procesos donde existe diversidad de piezas con cambios frecuentes de producción. Los sistemas de visión artificial que se usan en la industria se aplican para realizar inspecciones visuales que pueden ser de alta o media velocidad, funcionamiento continuo o la respetabilidad del proceso. (M & J, 2015)

El objetivo de un sistema de inspección por visión artificial suele ser el control de calidad de una pieza, lo que puede abarcar sus dimensiones, números de serie (clasificación), la presencia de componentes defectuosos, etc.

Las ventajas de un sistema de visión en la industria son:

- Automatizar tareas repetitivas de inspección realizadas por operadores.
- Realizar controles de calidad de productos que no era posible verificar por métodos tradicionales.
- Realizar inspecciones de objetos sin contacto físico.
- Realizar la inspección del 100% de la producción (calidad total) a gran velocidad.

- Reducir el tiempo de ciclo en procesos automatizados.
- Realizar inspecciones en procesos donde existe diversidad de piezas con cambios frecuentes de producción.

## 2.6. Sistemas de seguridad activa en robótica

Según la tecnología utilizada para resguardar la vida o seguridad de un operador humano en procesos automatización que usen robots es necesario implementar acciones de seguridad pueden ser mediante el uso de:

- **Interruptores electromecánicos convencionales.** Riesgo de desacople mecánico, necesidad de un buen ajuste e instalación mecánica, vida limitada en número de maniobras, mantenimiento elevado.
- **Interruptores con actuador separado.** El actuador siempre unido al resguardo móvil se inserta en el cuerpo del interruptor, más fiable, y con un montaje más sencillo.
- **Sensores magnéticos codificados.** Actuación por magnetismo, su interior está formado por una serie de imanes codificados, y no es necesario un ajuste muy preciso, permitiendo holguras de hasta 15 milímetros.
- **Sensores por transponder.** Actuación por efecto hall al acercarse a la zona de trabajo el sensor (cerrando la puerta), acumula la energía suficiente para emitir un código que es captado por él mismo. Si el código es el preasignado activará las salidas indicando que el resguardo está protegiendo.
- **Mando de validación.** Dispositivo de mando adicional accionado manualmente y que utilizado en combinación con el mando de arranque pulsándolo de forma continua permite hacer funcionar a la máquina. Puede tener dos o tres posiciones. Normalmente está ubicado en el mando portátil o en la consola de programación.
- **Mando sensitivo (acción continuada).** Son aquellos que requieren una acción continuada sobre los dispositivos de mando para que la acción sea efectiva. También suelen estar ubicados en el mando portátil o en la consola de programación.

Referente a las zonas de carga y/o descarga de materiales, se pueden utilizar dispositivos físicos, con una frecuencia de apertura cíclica o dispositivos de protección activos, alfombras, cortinas o barreras ópticas inmateriales o scanner de protección de áreas.

- **Función de seguridad 'Parada de emergencia'**. Debe de funcionar y ser operativa permanentemente, sea cual sea el modo de trabajo del robot o la celda. Las setas deben estar ubicadas en cada puesto de trabajo, ya sea fijo o portátil, en los paneles de operador principales o mandos sensitivos, y deben de estar siempre operativos.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En este capítulo se detalla el diseño de los componentes de una línea de clasificación asistida por un manipulador, mediante el uso de visión artificial y un sistema de seguridad activa.

En la línea de clasificación, se diseñará un gripper adaptativo para el brazo robótico MELFA RV-2SDB con el fin de conseguir un mejor agarre y manejo de las piezas conforme a los patrones. Las piezas con los distintos patrones serán transportadas por una banda, luego se implementará un algoritmo de reconocimiento de patrones por su forma; así como también un algoritmo de control para el movimiento y posicionamiento del robot usando la cinemática inversa.

#### 3.1. Diseño del gripper adaptativo

Existen criterios que se deben tomar a la hora de diseñar un efector final para un manipulador robótico, tales como:

- 1) Bajo peso que permita tener un mejor manejo de la carga útil, aumento de las aceleraciones y tiempo de proceso mínimo.
- 2) Dimensiones apropiadas al tamaño de la pieza de trabajo.
- 3) Fuerza máxima requerida para garantizar la seguridad y prevención de daños a las piezas.
- 4) Rigidez para mantener la exactitud del robot y reducir las vibraciones.
- 5) La fuente de alimentación debe estar disponible para el robot.
- 6) Formas de seguridad para que el material no se deje caer cuando falle la fuente de alimentación.
- 7) Realizar conexiones holgadas y flexibles en los cables para mayor movimiento.
- 8) El mantenimiento debe ser fácil y rápido. (Ramirez, 2003)

El modelo del gripper para utilizar en la línea de clasificación robotizada, se seleccionó conforme a las alternativas de diseño de grippers adaptativos que se

muestran en la tabla 3., donde el signo positivo representa las características favorables y el signo negativo las características no favorables en cuanto a las consideraciones de diseño.

**Tabla 3.**

*Alternativas de diseño.*

<b>MODELOS</b>	Electrónico	Neumático	De vacío
			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Electrónico	Neumático	De vacío
Peso	+	+	-
Dimensiones	+	+	+
Material Construcción	+	+	-
Fuerza Requerida	+	-	-
Rigidez	+	-	-
Fuente Alimentación	+	-	-
Seguridad	+	-	-
Conexiones	+	+	+
Mantenimiento	+	+	-

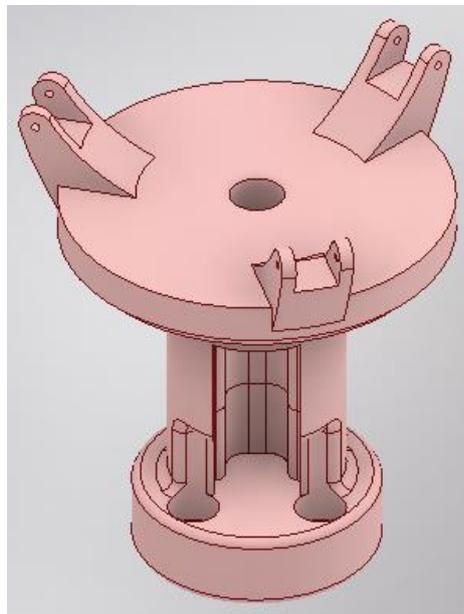
Una vez analizadas las alternativas de diseño y realizada la evaluación se llega a la conclusión de que el gripper adaptativo electrónico cumple adecuadamente con los requerimientos, obteniendo una solución idónea para la clasificación y manipulación de piezas por sus patrones.

### 3.1.1. Modelado mecánico del gripper adaptativo

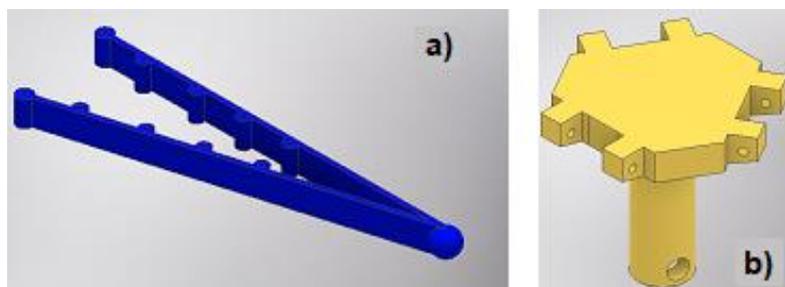
Para el diseño mecánico del gripper es de gran importancia el uso de un software de diseño asistido por computador, con el fin de simular y validar el mecanismo que conforman la estructura.

El diseño asistido por computador (CAD) es esencial para crear representaciones gráficas de objetos físicos. Esto permite a un ingeniero examinar interactivamente las variantes de diseño y encontrar el diseño óptimo. Otro beneficio del software de diseño es simular análisis de esfuerzo – deformación, movimiento, verificando que el diseño sea seguro y minimizando el uso de recursos en su fabricación.

A continuación, se presenta el modelado del gripper adaptativo, que consta del cuerpo, acople de garras y garras.

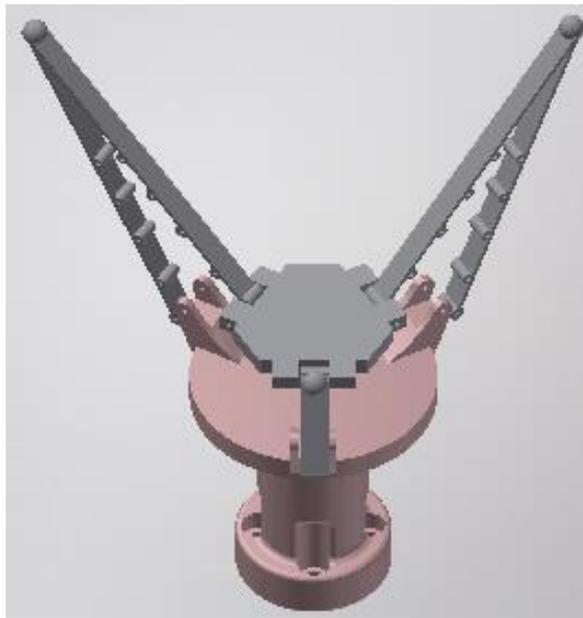


**Figura 9.** Cuerpo del gripper adaptativo.



**Figura 10.** Partes del gripper. a) Acople de garras. b) Garra.

CONTINUA



**Figura 11.** Ensamble gripper adaptativo.

### **3.1.2. Selección del motor para la apertura y cierre del gripper**

Para efectuar el agarre de objetos automáticamente es necesario incorporar un micromotor lineal dada que su carrera es adecuada para la apertura y cierre del gripper.

Según la investigación de micromotores lineales, en el mercado no existen opciones de acuerdo con las dimensiones (15 x 20 x 40 mm) que se requieren para insertarlo dentro del cuerpo del gripper y un recorrido de su vástago de 25mm. Por lo tanto, se consideró un micro servo lineal llamado PQ12, el cual cumple con el dimensionamiento requerido, así como la carrera para la apertura y cierre del gripper.

#### **a) Micro actuador lineal PQ12**

Es un dispositivo sofisticado de movimiento lineal con realimentación y control de posición. Su manejo es sencillo, existen varias relaciones de transmisión y opciones de voltaje para darle configuraciones variadas de velocidad / fuerza. (Actuonix, 2016)



**Figura 12.** Micro actuador lineal PQ12.

Fuente: (Volusion, 2014)

### 3.2. Diseño de la banda transportadora

Para el diseño de una banda transportadora es necesario tener en cuenta particularidades como; el tipo de objetos a transportar, peso, velocidad, material con el cual será construida, costos y que principalmente cumpla con su función sin ningún tipo de interrupción.

La banda transportadora para usar en la línea de clasificación robotizada se seleccionó conforme a los tipos de bandas que se presentan en la tabla 4., donde el signo positivo representa las características apropiadas y el signo negativo las características no apropiadas en cuanto a las consideraciones para su diseño.

**Tabla 4.**

*Tipos de banda transportadora*

TIPOS			
CARACTERÍSTICAS	Banda de dos Rodillos	Banda por Gravedad	Banda multiples Rodillos
Costo	+	-	-
Peso	+	-	-
Velocidad	+	+	+
Material Construcción	+	-	-
Rigidez	+	-	+

De acuerdo con el análisis de las características de cada banda, se identificó que la mejor opción es la banda de dos rodillos, pues es económica, de fácil construcción debido a que sus materiales son accesibles. También se agregan que para la línea clasificación la banda debe ser rígida y moverse a velocidad constante en forma horizontalmente para poder realizar la clasificación de patrones mediante visión artificial.

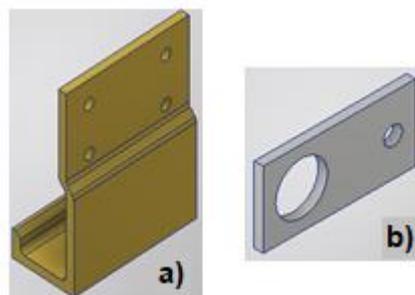
### 3.2.1. Modelado mecánico de la banda transportadora

Una banda transportadora es un sistema de transporte continuo formado básicamente por una banda continua que se mueve entre dos rodillos.

A continuación, se presenta el modelado de la estructura de la banda transportadora, que consta del armazón, tensores, rodamientos, rodillos, cinta y motor.



**Figura 13.** Armazón de la banda transportador.

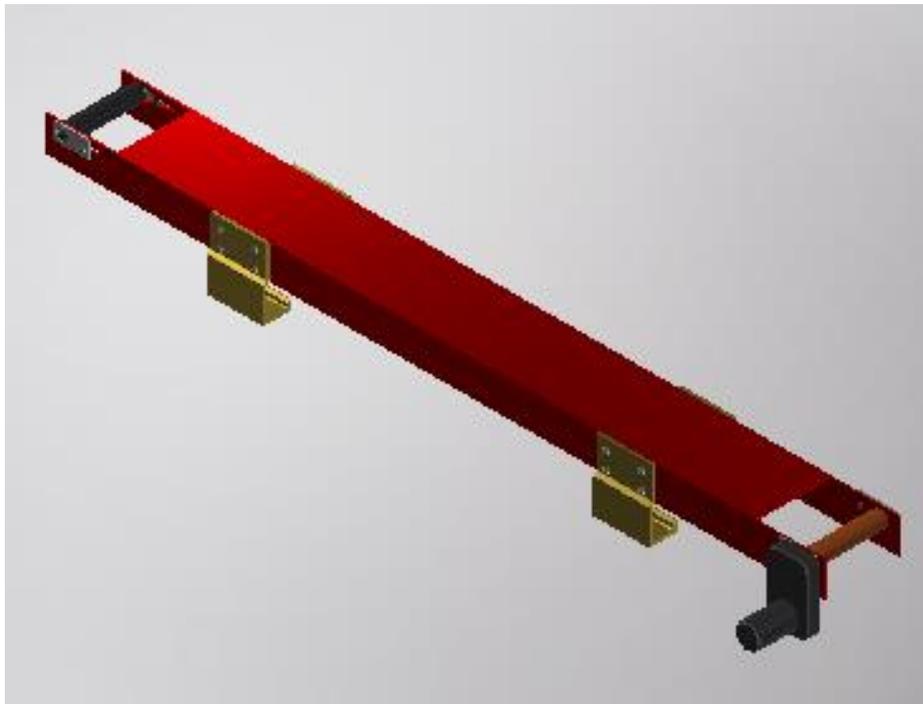


**Figura 14.** Partes del Armazón de la banda transportadora. a) Soporte. b) Tensor.

CONTINUA



**Figura 15.** Rodillos. a) Rodillo Motriz. b) Rodillo Tensor.



**Figura 16.** Ensamble de la banda transportadora.

### 3.2.2. Selección de componentes de la banda transportadora

Es necesario determinar el tipo de cinta a utilizar, así como también el tipo de motor para su funcionamiento.

#### a) Cinta transportadora

En la tabla 5., se considera los tipos de cintas según la superficie de la carga a transportar.

**Tabla 5.***Tipos de cintas.*

<b>TIPO DE FABRICACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Superficie lisa	Para instalaciones horizontales de corta distancia y pequeño ángulo de inclinación.
Superficie rugosa	Para evitar el desplazamiento de las piezas transportadas.
Superficie con nervios en V	Para instalaciones de elevado ángulo de inclinación, a fin de impedir el corrimiento del material.

La opción de tipo de cinta más adecuada es la de superficie lisa, ya que para el transporte de los objetos no se requiere inclinación y su distancia de recorrido es corta.

#### **b) Motor de la banda transportadora**

Para el movimiento de la banda es necesario optar por un motor de velocidad muy baja y un torque alto, ya que al hacer el reconocimiento de patrones por su forma no se necesita de premura sino de lentitud mientras el algoritmo de reconocimiento de objetos realiza su trabajo y envía la información necesaria para el posicionamiento del robot.

Conforme al análisis anterior, se seleccionó el motor de 12V DC marca CNBTR, mismo que cumple satisfactoriamente con las características para acoplarlo a la banda, tanto en dimensiones como en especificación de la velocidad, siendo esta última característica imprescindible para la clasificación de piezas por su forma.

- **Motor CNBTR**

El motor eléctrico CNBTR, es usado en máquinas de soldadura eléctrica, hornos, procesadores de basura, electrodomésticos, entre otros, dada su baja velocidad de salida, posee una caja reductora de engranes que brinda una razón de reducción de 960:1.

Además, tiene un torque alto para mover cargas considerables que en este caso es la fuerza de tensión de la banda. El eje de salida puede cambiar la dirección de rotación para ser utilizado en varias aplicaciones.



**Figura 17.** Motor con caja reductora CNBTR.

Fuente: (Amazon, 2016)

En la tabla 6., se muestra las características más relevantes del motor CNBTR.

**Tabla 6.**

*Características técnicas del motor eléctrico CNBTR.*

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Tensión nominal	12V DC
Velocidad del motor	4500RPM
Velocidad de salida de caja reductora con carga	3.8RPM
Velocidad de salida de caja reductora sin carga	4.7RPM
Razón de reducción	960:1
Torque	80KG.CM
Tamaño del motor	5.7cm x 3.6cm "(L x Día)"
Dimensiones totales	10cm x 6cm x 7.5cm

### c) Rodillo motriz y tensor

Para el diseño y dimensionamiento de los rodillos, se tomó en como consideración principal el diámetro del eje del motor eléctrico (8 mm).

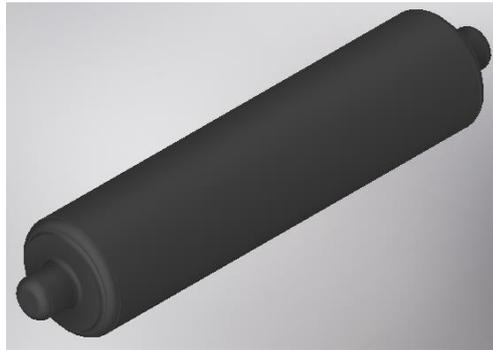
Además, se tomó en cuenta 100 mm ancho de la cinta de la banda y se asumió un diámetro externo para los rodillos de 25mm, ya que se debe mantener la uniformidad del diseño de la estructura.

En la figura 18., se muestra que el rodillo motriz se conecta directamente al eje del motor eléctrico por lo que en un extremo tiene una unión hueca de 8 mm de diámetro interno y 9 mm de diámetro externo. Al otro extremo tiene una unión solida de 9 mm de diámetro. Cada unión tiene una longitud de 10 mm.



**Figura 18.** Rodillo Motriz.

En la figura 19., se presenta el rodillo tensor; tiene dimensiones similares al rodillo motriz es decir de 100 mm de ancho, 25 mm de diámetro y 10 mm de longitud en sus uniones, cuya única diferencia radica en que no existe unión hueca y su función principal es conseguir contacto entre la cinta y el rodillo motriz, al tensar o liberar la cinta según se requiera.



**Figura 19.** Rodillo Tensor.

#### d) Rodamientos

Ya seleccionado el motor se confirma el diámetro de su eje (8mm) y el espesor de la unión entre el eje del motor y el rodillo motriz, siendo de 0.5 mm. Para calcular la dimensión del diámetro interno del rodamiento se usa la ecuación 2., de la cual se obtuvo un diámetro de 9 mm.

$$dr_i = dm + (2 * espU) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$dr_i = 8mm + (2 * 0.5mm)$$

$$dr_i = 9mm$$

Donde:

$dr_i$  = Diámetro interno del rodamiento

$dm$  = Diámetro del eje del motor

$espU$  = Espesor de unión entre eje del motor y el rodillo

Se adquirió 4 rodamientos de 9 mm de diámetro interno con 11 mm de diámetro externo y espesor de 5mm, como se puede ver en la figura 19., cada rodamiento está situado a los extremos de los rodillos dentro de la estructura de aluminio de la banda transportadora.



**Figura 20.** Rodamientos de 9 mm de diámetro externo.

Fuente: (Waypart, 2015)

### 3.3. Selección de componentes para visión artificial

En línea de clasificación automatizada es necesario el uso de un dispositivo de adquisición de imagen puesto que con él se obtiene la información necesaria para realizar el reconocimiento de patrones por su forma y mantener al operador seguro, mediante el uso de visión artificial.

#### a) Cámara Web

Actualmente se obtienen gran variedad de cámaras web en el mercado y pueden ser utilizadas en tareas específicas como video conferencias o video vigilancia. Para este trabajo se requiere de una cámara que permita obtener secuencias de video nítidas y en tiempo real, ya que se acoplará en una aplicación de seguridad activa para resguardar la seguridad de personas en una celda robotizada y además se utilizara para la clasificación de piezas por su forma.

En la tabla 7., se presenta algunos criterios que se tomaron en cuenta para la selección de la cámara web, donde el signo positivo representa las características óptimas y el signo negativo las características no óptimas.

**Tabla 7.**

*Criterios de selección de cámaras web.*

CRITERIOS DE SELECCIÓN	Logitech C920 HD Pro	Papalook PA452	Creative Live Cam Chat HD
Resolución	+	-	-
FTP(fotogramas/segundo)	+	-	-
Compatibilidad	+	+	+
Drivers	+	+	+
Campo visual	+	-	+
Costo	-	+	+

Finalizado el análisis de cada uno de los criterios anteriores, se seleccionó la cámara web Logitech C920 HD Pro, ya que presentó mejores características de relevancia para el proyecto tales como la resolución, FTS y el campo visual.

- **Cámara web Logitech C920 HD Pro**

Esta cámara puede grabar imágenes excepcionales en pantalla panorámica, abarca un campo visual de 78° con calidad full HD (1800 p).

Tiene una precisión para proporcionar constantemente alta definición hasta 30 cuadros por segundo y grabación de videos nítidos, aunque la iluminación sea escasa. (Logitech, 2017)



**Figura 21.** Cámara Web Logitech C920 HD.

Fuente: **(Logitech, 2017)**

Este modelo también cuenta con una tecnología de compresión de alta definición llamada H.264. Esta singular característica permite comprimir el contenido mientras se esté grabando, permitiendo una mayor fluidez de información. Por lo tanto, el computador no tiene que esforzarse para obtener videos de calidad.

Es perfectamente compatible con los sistemas operativos de Windows 7, 8, 10 o superiores. Además de funcionar en modo USB Video Device y contar con conexión a internet. (GamingPotion, 2017)

## **b) OpenCV**

El software OpenCv (código abierto visión por ordenador), esta liberado bajo una licencia BSD (Berkeley Software Distribution), su uso es libre, fue diseñado para brindar eficiencia computacional con un fuerte enfoque en aplicaciones de tiempo real. Es la biblioteca de código más popular y avanzada para aplicaciones relacionadas con la visión por ordenador, tiene interfaces de C++, C, Python y Java, también es compatible con Ubuntu Linux.

OpenCV permite realizar diversas tareas desde unas muy básicas como captura y pre tratamiento de los datos de imagen y en los algoritmos de alto nivel tareas como: extracción de características, seguimiento de movimiento, aprendizaje automático, clasificación de patrones. (Creative Commons, 2016)



*Figura 22.* Logo OpenCV.

Fuente: (OpenCV, 2015)

### **Estructura de OpenCV 2.4.8**

Tiene una estructura modular, lo que significa que el paquete incluye varias bibliotecas compartidas o estáticas. Los módulos que están disponibles son:

- **Funcionalidad básica.** Un módulo compacto que define las estructuras de datos básicas, incluyendo las Mat (matriz multidimensional) y funciones básicas utilizadas por todos los demás módulos.
- **Procesamiento de imágenes.** Un módulo de procesamiento de imágenes que incluye el filtrado de imágenes no lineal y lineal, transformaciones geométricas de imágenes (redimensionar, afín y la perspectiva de

deformación, reasignación genérica basado en tablas), la conversión de espacio de color, histogramas, etc.

- **Procesamiento de vídeo.** Un módulo de análisis de vídeo que incluye la estimación de movimiento, la sustracción del fondo, y los algoritmos de seguimiento de objetos.
- **objdetect.** Detección de objetos e instancias de las clases predefinidas (por ejemplo, caras, ojos, tazas, personas, vehículos, etc.).
- **highgui.** Una interfaz fácil de usar para las capacidades de interfaz de usuario sencilla.
- **video.** Una interfaz fácil de usar para la captura de vídeo y códec de vídeo.
- **calib3d.** Módulo básico con múltiples algoritmos de visión geométrica, calibración de cámara; algoritmos de correspondencia estéreo y elementos de la reconstrucción 3D. (OpenCV, 2015)

### c) **Matlab**

MATLAB (Matrix Laboratory, “laboratorios de matrices”) es un software matemático con entorno de desarrollo integrado (IDE) que tiene un lenguaje de programación propio (Lenguaje M) y es multiplataforma.

Este software es utilizado para varias aplicaciones como por ejemplo en visión artificial, cálculos matemáticos, entre otros; en este caso has sido escogido para realizar el control del robot MELFA RV – 2SDB con comandos o instrucciones que son enviadas al controlador del robot mediante comunicación Ethernet. Los comandos o instrucciones que recibe el robot se encuentran en el anexo B.

### **Funciones**

- Dentro de sus principales funciones se encuentran:
- Manipulación de Matrices.
- La representación de datos y funciones.
- Implementación de algoritmos.
- Creación de interfaces de usuario (GUI).

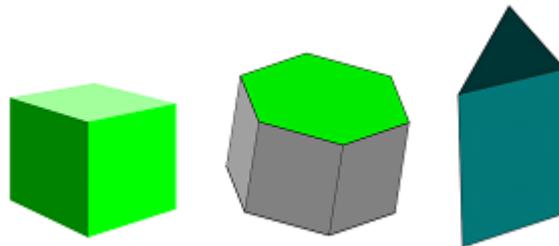
- Comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos Hardware.



**Figura 23.** Matlab.

#### **d) Patrones para la clasificación**

Para la selección y clasificación de figuras por su forma se utilizará patrones tales como cuadrados, triángulos, hexágonos, los que serán fabricados en polímero de tipo termoplástico más conocido como foami en dimensiones proporcionales al gripper.



**Figura 24.** Figuras geométricas.

## CAPÍTULO IV

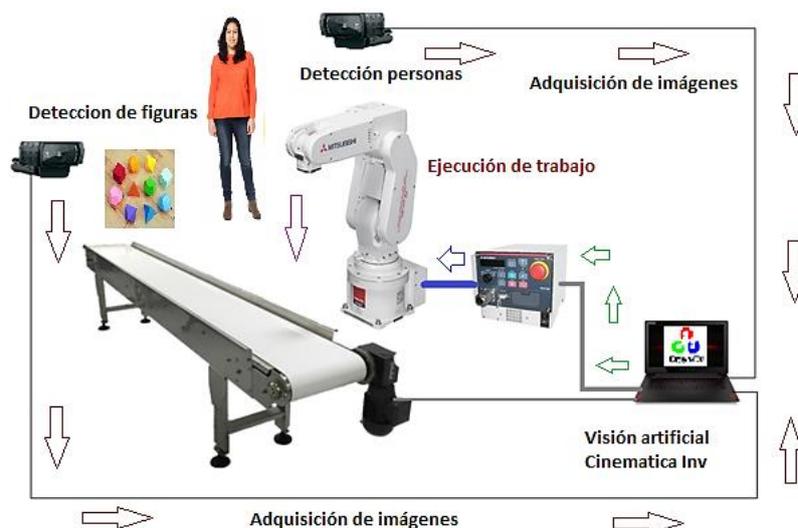
### 4. IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA

En este capítulo se muestran las etapas de funcionamiento de esta aplicación, donde lo primero será la adquisición y procesamiento de imágenes para obtener características de la imagen, luego se establece la comunicación entre el software de procesamiento de imagen y el software de cálculo de la cinemática inversa y por último el envío de coordenadas de posicionamiento para el control del brazo robótico, obteniendo como resultado el control autónomo del brazo robótico, mediante el envío de coordenadas.

#### 4.1. Unión de los subsistemas de línea de clasificación automatizada

- **Hardware**

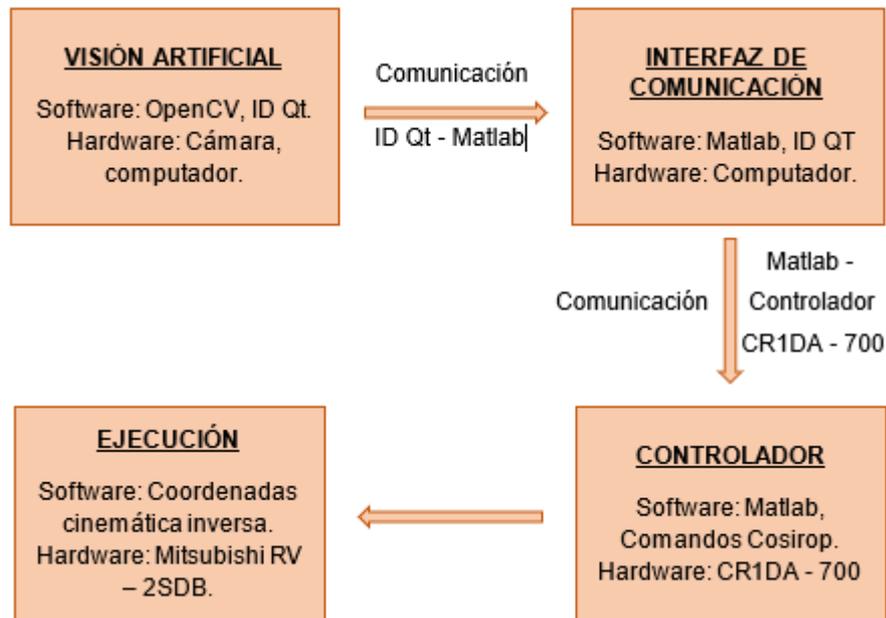
El primer subsistema es el hardware, donde se verifica que todos los elementos físicos puedan ser controlados, siendo estos: cámaras, controlador del brazo robótico, banda transportadora y computador. Físicamente el sistema total para la aplicación se puede apreciar en la figura 25.



**Figura 25.** Conexión de componentes físicos.

- **Software**

En la figura 26, se puede observar las etapas del sistema y como fluye la información desde la adquisición de imágenes hasta ejecutar el movimiento.



**Figura 26.** Etapas y flujo de información de sistema.

## 4.2. Visión artificial

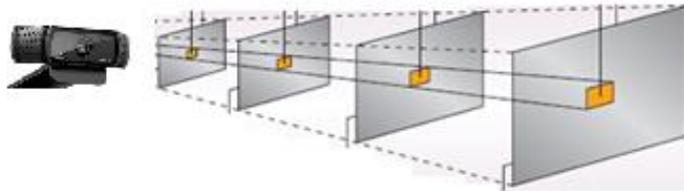
En este apartado se encuentran dos fases principales, la primera es la adquisición de imágenes y la segunda fase el procesamiento de imágenes, a la que en este trabajo se la denominará determinación de pose.

### 4.2.1. Adquisición de imagen

El procesamiento de imágenes debe ser rápido al tratarse de un sistema de clasificación en movimiento y al usar un sistema de seguridad basado en la detección de personas dentro del área de trabajo del robot. Las imágenes son adquiridas por dos cámaras, la primera se utiliza para el reconocimiento de piezas por su forma geométrica y la segunda para la detección de personas dentro del área de trabajo; estas imágenes deben ser en tiempo real o lo más aproximado posible para enviar comandos de control al brazo robótico.

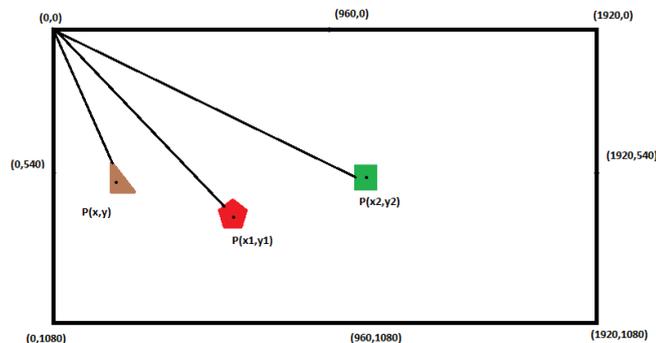
Las imágenes receptadas por cada una de las cámaras deben encontrarse dentro de un área específica, en la cual los objetos puedan ser enfocados de manera óptima para visualizar cada uno de sus detalles.

En la figura 27., se muestra el campo visual que poseen las cámaras utilizadas en el sistema.



**Figura 27.** Campo visual de las cámaras.

Las cámaras entregan imágenes de alta definición, en una resolución 1920 x 1080 pixeles, es decir que el tamaño de la imagen permitirá determinar la posición de las figuras en movimiento, en los ejes “x” y “y” dentro de un espacio de trabajo preestablecido. En la figura 28., se puede observar que los objetos son detectados en cualquier posición siempre y cuando estén dentro del espacio de trabajo.

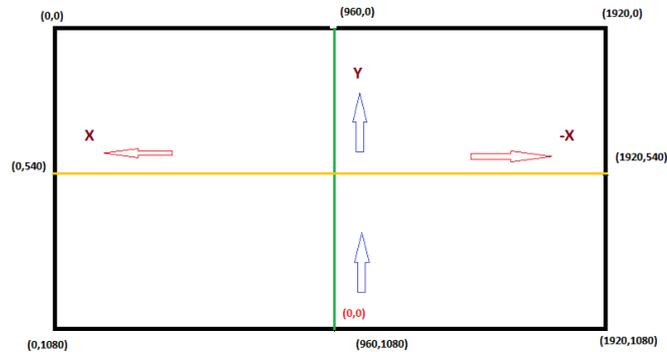


**Figura 28.** Posición de las figuras.

#### 4.2.2. Determinación de la pose

El objetivo de esto es poder tener la posición del centroide de las figuras con respecto al brazo robótico para que este pueda posicionarse por encima de ellas y pueda tomarlas, por esto se establece un nuevo punto centro en la imagen adquirida y así se obtiene el rango de desplazamiento en el eje “X” y luego en el eje “Y”,

El punto centro establecido dentro de la imagen, será la referencia para que el brazo robótico obtenga la ubicación a la que debe posicionarse como se detalla en la figura 34.



**Figura 29.** Punto centro.



**Figura 30.** Posicionamiento del brazo robótico con respecto a la banda.

Es una metodología llamada visual servoing o control servo visual. Usa sistemas de visión por computador para controlar movimientos o acciones de un robot o plataforma. (Maldonado & Calderon, 2014)

En este caso controla los movimientos de las articulaciones de un brazo robótico para el posicionamiento y recolección de piezas sobre una banda transportadora.

Por medio de esta técnica se puede adquirir datos de imágenes capturadas por una cámara que se encuentre montada sobre una plataforma móvil.

### 4.3. Comunicación entre ID Qt (OpenCV) - Matlab.

Una vez obtenidas las coordenadas necesarias para el correcto posicionamiento del brazo robótico, estas deben ser enviadas al controlador del brazo robótico, esto se lo realiza mediante el uso de una comunicación local entre ID Qt y MATLAB.

El ID Qt al ser un *framework* orientado al desarrollo de software, contiene una compilación de librerías, teniendo preestablecidas funciones para diferentes procesos; en este caso se utiliza las librerías: *QTcpSocket* que sirve para la comunicación local mediante sockets, *QTcpServer*, establece el protocolo de comunicación TCP/IP, *QHostAddress* esta librería abre los puertos de comunicación para que puedan ser leídos, y por último *QString* siendo esta la que transforma todos los datos a una cadena de caracteres para que puedan ser enviados de una manera adecuada.

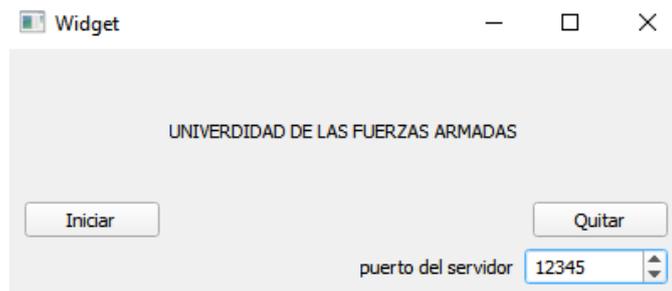
Al tener las librerías antes mencionadas en la programación se puede establecer la comunicación adecuada con cualquier programa, teniendo presente que deben ocupar el protocolo de comunicación TCP/IP, en esta aplicación el ID Qt será quien envíe datos para que estos puedan ser escuchados por lo que toma el nombre de servidor.

Para establecer la comunicación se debe utilizar la línea de código, `connect(this, &LocalServer::newConnection, [&](){mSocket = nextPendingConnection();})`, la cual crea una nueva conexión y abre el socket para que este pueda enviar datos, teniendo presente que una vez abierto este, debe esperar a un receptor y así comenzar la transmisión unidireccional de datos.

Cuando los sockets se encuentran abiertos se debe dar un nombre para que los receptores pueden enlazarse de forma adecuada con la siguiente línea de código `listen(QHostAddress::AnyIPv4, ui->puerto->value())`, este comando da el protocolo de comunicación IPv4, y espera que se le asigne un nombre que en este caso será 12345.

Una de las particularidades de la comunicación TCP/IP, es que el envío de datos se lo realiza mediante el uso de cadena de caracteres, por lo que la información

obtenida de los procesos anteriores sea el reconocimiento de figuras o de personas, debe ser transformada esto se lo realiza con la línea de código, `str6.append(QString("%1 %2 %3 %4 ").arg(ccx).arg(ccy).arg(op).arg(perso));`, esta línea de código agrupa la información en una cadena de caracteres, y luego la transforma a código ASCII, para que el receptor tenga de una manera estandarizada la información.

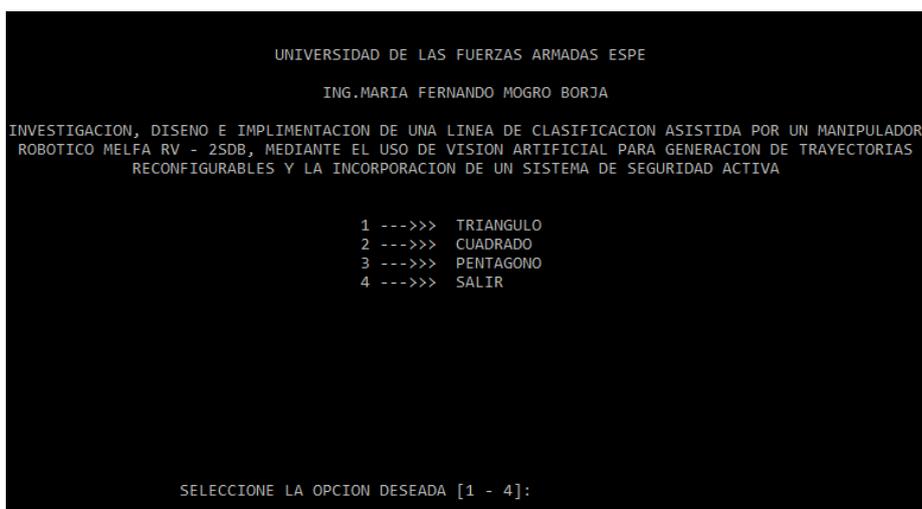


**Figura 31.** Inicio de servidor

Las líneas anteriores son necesarias para establecer la comunicación y envío de datos con un receptor, en este caso el receptor es el software de MATLAB, tomando así el nombre de cliente y posteriormente será el encargado de enviar las coordenadas de posicionamiento para el brazo robótico.

Para escuchar los datos provenientes del ID Qt, en MATLAB se usa el código `g=tcpcclient('localhost',12345);`, el cual abre estable la comunicación por medio del nombre del puerto el cual se asignó en los pasos anteriores al puerto de envío de datos; como se menciona antes, la información fue transformada a código ASCII, por lo que es necesario volverla a transformar a lenguaje decimal, para poder ser interpretada tanto por el software, como por los usuarios esto se lo hace mediante el comando `"num = str2num(array);"`, realizados estos pasos se obtiene la información lista para ser usada en el siguiente proceso.

Con los datos recibidos se procede a la interpretación, cada uno de ellos, unos serán las coordenadas para la ubicación del brazo robótico, otros servirán para el correcto paletizado de las piezas, y por último para la detención del todo el proceso en caso de que exista una persona dentro del área de trabajo.



**Figura 32.** Selección de pieza a clasificar

#### 4.4. Comunicación entre Matlab – Controlador CR1DA – 700

Matlab es una herramienta computacional que facilita el control y uso del controlador CR1DA – 700 para la manipulación del robot Melfa RV – 2SDB.

El controlador del brazo robótico posee un puerto de comunicación Ethernet, por medio del cual se puede enviar las coordenadas de posicionamiento y permite mantener el control de los movimientos del robot. Para que este pueda reconocer las órdenes enviadas desde el computador se debe seguir una secuencia que es el protocolo PPI (interfaz punto-punto) y un formato de envío de datos desde Matlab al brazo robótico Melfa RV – 2SDB que se puede apreciar en la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Formato de envío de datos al controlador*

<b>A</b>	Instrucción para empezar el envío de datos.
<b>B</b>	Instrucción del brazo robótico.
<b>C</b>	Salto de línea para finalizar.

Se debe establecer la comunicación entre el software Matlab y el controlador, definiendo ciertos parámetros como por ejemplo la dirección IP que tiene el brazo robótico (192.168.0.20), el puerto (10001), y la dirección que tendrá la computadora, es decir que la IP de la computadora solo cambiara la última cifra, la cual puede ser un valor de entre 0 hasta 255.

La comunicación entre el controlador del robot y el software de cálculo matemático se lo realiza mediante protocolo TCP/IP usando el comando *tcpip*, que es propio de Matlab y permite el envío de comandos al controlador de brazo robótico. En la figura 36., se puede observar la línea de código para establecer la dirección IP y el puerto en el cual se va a escribir los comandos para el control del brazo robótico. Configurado la dirección IP y el puerto se debe abrir la comunicación con el comando *fopen(variable)*, y para cerrar el puerto y por ende la comunicación *fopen(variable)*, ver figura 37.

```
t=tcpip('192.168.0.20',10001);
```

**Figura 33.** Declaración de la dirección IP y puerto del Robot.

```
fopen(t)  
fclose(t)
```

**Figura 34.** Apertura y cierre de comunicación en Matlab.

El controlador del brazo robótico acepta comandos del software COSIROP, los cuales ayudan a la ejecución de movimientos. En la tabla 9., se muestran los comandos admitidos en Matlab para el brazo robótico,

**Tabla 9.***Comandos para comunicación Matlab – Controlador (Robot)*

COMANDOS	ACCIÓN	DETALLE
1;1;CNTLON	Inicia el sistema de control donde se enviará un movimiento.	
1;1;SRVON	Enciende los servos del brazo.	
1;1;EXECHOPEN 1	Abre el gripper	
1;1;RSTALRM	Resetea todas las alarmas	
1;1;PPOSF	Solicita la posición actual del brazo	Respuesta: oKX;178.20;Y;3.04;Z;631.88;A;0.62;B;63.79;;6,0;70;0.00;00000000
1;1;EXECJOVRD X	Establece la velocidad para movimientos lineales	Velocidad entre 1 y 100%.
1;1;EXECJCOSIROP=(J1,J2,J3,0.000,J5,J6)	Define las coordenadas para el movimiento por Juntas.	Ejemplo: 1;1;EXECJCOSIROP=(5.00,-40.00, 0.00,0.00,0.00,5.00)
1;1;EXECMOV J_CURR + JCOSIROP	Ejecuta el movimiento por Juntas con los datos anteriores	
1;1;EXECSPD X	Establece la velocidad para movimientos en X,Y,Z.	Velocidad entre 1 a 100%
1;1;IOSIGNAL0;0	Solicita el estado de los sensores	Respuesta de ejemplo: Qok820000, indica que el sensor de la pinza está activado.
1;1;PRTVERLISTL	Crea una lista para posiciones.	

## 4.5. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.5.1. Determinación de área útil de cámaras

Para procesar la información recibida desde un espacio bidimensional (imagen 2D), se hace uso de cámaras de video, las cuales funcionan como un sensor que ayuda a obtener imágenes para su posterior procesamiento. Las cámaras Logitech C920 HD Pro requieren de drivers, mismos que deben ser instalados previamente en el computador, de esa manera se obtendrá una comunicación adecuada con la aplicación desarrollada y posteriormente él envió de la información recopilada.

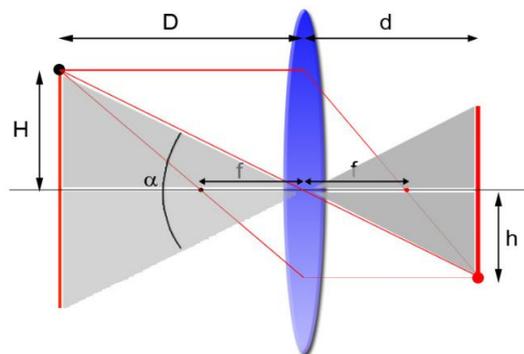
Al trabajar simultáneamente con dos cámaras en una misma aplicación, requiere un alto uso de los recursos computacionales, provocando un mínimo retraso en video, que no afecta en su mayoría al procesamiento. Cada cámara de video está destinada para realizar una tarea específica dentro de la aplicación:

- 1.- Cámara para clasificación de piezas geométricas por su forma
- 2.- Cámara de seguridad activa, detecta personas dentro del área de trabajo del brazo robótico

Para que cada una de las cámaras realice adecuadamente su trabajo, se debe establecer un área útil, que garantice la correcta detección ya sea de personas o de piezas geométricas, ya que al finalizar el correspondiente procesamiento se envían señales de control hacia el brazo robótico, las cuales determinan el movimiento o paro del robot.

- **Área útil de la cámara de clasificación de piezas**

A partir ángulo de visión ( $\alpha$ ) de  $78^\circ$  característico de la cámara Logitech C920 HD, se procede a medir la distancia ( $H$ ) tomada desde el eje central hasta un extremo de la banda transportadora, que es 0.425m, como se observa en la figura 33. Una vez obtenidos los datos se procede al cálculo de la distancia focal que en este caso definirá la altura a la que se debe colocar la cámara.



**Figura 35.** Relación del Angulo de visión respecto a la distancia focal

Fuente: <http://fotoigual.com/8-calculo-del-angulo-vision-funcion-la-distancia-focal-tamano-del-sensor/>

**Datos:**

$$\alpha = 78^\circ$$

$$H = 0.425 \text{ m}$$

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{H}{D}$$

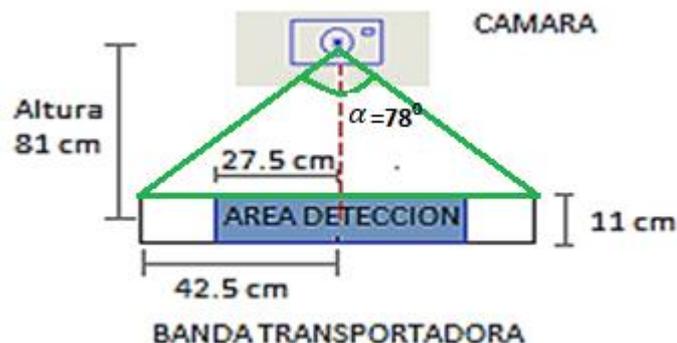
$$D = \frac{H}{\tan \frac{\alpha}{2}}$$

$$D = \frac{0.425 \text{ m}}{\tan \frac{78}{2}}$$

$$D = 0.8097 \text{ m}$$

$$D \approx 0.81 \text{ m} = 81 \text{ cm}$$

Se ubica la cámara en el centro de la banda transportadora y a una altura de 81 cm (0.81m), para obtener un amplio campo visual de la trayectoria de la banda y sobre todo una correcta detección de figuras geométricas. Tomando en cuenta el alcance del brazo robótico y para la correcta manipulación de las piezas, se establece una distancia lateral menor de 27.5cm (0.275m), siendo este el eje **X**, mismo que al someter a conversión oscilara en un rango de valores de  $\pm 375$ , en tanto que, para el eje **Y** se determina la distancia del ancho de la banda de 11cm (0.11m), con valores de conversión de -260 a -411, estableciendo un **ÁREA DE DETECCIÓN ÚTIL** rectangular de 605 cm<sup>2</sup> (0.0605 m<sup>2</sup>) como se muestra en la siguiente figura 34.

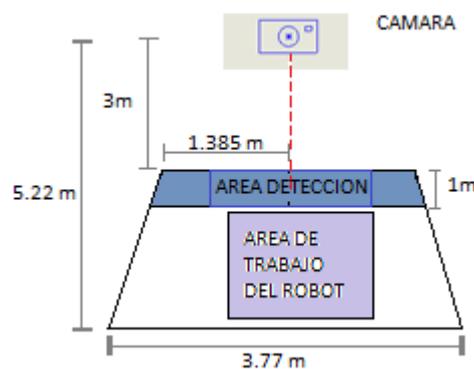


**Figura 36.** Área de detección de la cámara de clasificación

Dentro del AREA DETECCION establecida, el algoritmo detecta las piezas geométricas, para enviar las respectivas coordenadas x, y del centro de masa de la pieza que se encuentre más propensa a salir de la banda. Dichas coordenadas enviadas permitirán que el brazo robótico se ubique sobre la pieza y posteriormente la recoja para su clasificación.

- **Área útil de detección de la cámara de seguridad activa**

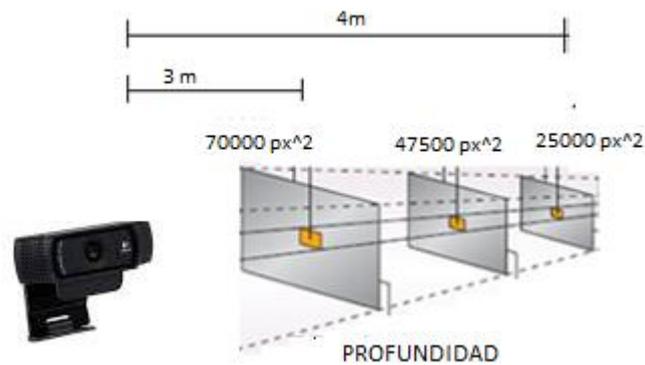
La cámara estática usada para la detección de personas que irrumpían dentro del área de trabajo del brazo robótico se ubicó a una distancia considerable, con el fin de que la imagen obtenida abarque la zona de seguridad de las personas. Se obtienen las siguientes medidas, de profundidad 5.22m, de profundidad horizontal a cada lado de 1.885m a partir del eje central de la cámara; las personas son detectadas a partir de los 3 m, medidos desde el centro de la cámara, a partir de esta distancia se tiene 1m para la detección, y al igual que la anterior cámara se obtiene un área de visión, donde se determina un área de detección útil, siendo esta de 2.77 m<sup>2</sup> como se observa en la figura 35.



**Figura 37.** Área de detección útil de cámara de seguridad

El área de detección de personas fue determinada al frente del área de trabajo del robot, en vista de que en la parte de atrás y a un costado se encuentra delimitado por una pared y al otro costado una estación Festo, por lo tanto, el tránsito de personas es únicamente por el AREA DETECCION indicada.

A continuación, en la figura 36, se muestra la perspectiva del campo visual que se obtiene desde la cámara, por ende, se determina que mientras la persona más cerca de la cámara se encuentre, el área será mayor y se apreciará lo contrario cuando este se encuentre más alejado.



**Figura 38.** Campo visual de detección

La siguiente tabla 10, indica los datos de áreas de personas obtenidos con la cámara, para poder identificar el área de detección útil que posteriormente se utilizará en el algoritmo de detección de personas dentro de la zona de seguridad del robot.

**Tabla10.**

*Área de detección en base a la profundidad del sujeto*

<b>Altura (m)</b>	<b>Área de detección (Píxeles<sup>2</sup>)</b>	<b>Distancia en profundidad (m)</b>
1.50	70000	3
	47500	3,5
	25000	4

En la tabla 11, se muestra la relación de áreas de personas con respecto a la distancia tomada desde el centro de la cámara, y el envío de valores para el control del brazo robótico, en el caso se detectar o no una persona.

**Tabla 11**

*Escalonamiento con respecto al área*

<b>Área de detección en píxeles <sup>2</sup></b>	<b>Señal de control</b>	<b>Acciones de control</b>
10000	0	Continua
15000	0	Continua
25000	1	Paro
30000	1	Paro
40000	1	Paro

47500	1	Paro
50000	1	Paro
70000	1	Paro
80000	0	Continua

#### 4.5.2. Verificación del Algoritmo de detección de personas usado para la cámara de seguridad

Para demostrar la detección de personas para seguridad activa mediante una cámara, se tomó diferentes distancias desde la cámara hasta la persona, teniendo presente que se marca con un +, si el algoritmo detecta personas, caso contrario se marcará con un - como se muestran en la tabla 12. A continuación, la figura 39 contiene una muestra de las imágenes que se tomaron con la cámara.



**Figura 39.** Muestra de imágenes cámara de seguridad

**Tabla 12**

*Detección de personas según la profundidad*

N° Pruebas	Rango de detección de personas en profundidad (metros)		
	<3	3 a 4	4 a 5
1	-	+	+
2	-	+	-
3	+	-	-
4	-	+	+
5	-	+	-
6	+	+	+

7	-	+	+
8	-	+	+
9	-	-	-
10	+	+	+
11	+	+	-
12	-	+	+
13	-	+	-
14	-	+	-
15	-	+	+
16	-	+	-
17	-	+	-
18	-	+	+
19	+	+	+
20	-	+	-
<b>T. Positivos</b>	<b>5</b>	<b>18</b>	<b>10</b>
<b>T. Negativos</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>25%</b>	<b>90%</b>	<b>50%</b>

Analizados los datos de la tabla anterior se determinó que con una distancia menor a 3m la detección de personas es de 25%, en el rango de 3 a 4m un porcentaje de 90% de detecciones de personas correctas y finalmente en el rango de 4 a 5m la detección fue del 50%. Se puede observar que en el rango de 3 a 4m la mayoría de las detecciones fueron correctas, en tanto que en los 2 restantes se nota que la detección es errónea en su mayor porcentaje. En el caso del rango menor a 3 la forma de las personas no se puede definir al estar muy cerca, en tanto que para el rango de 4 a 5m la zona de trabajo está muy cerca y la silueta suele distorsionarse con los equipos presentes

#### 4.5.3. Evaluación del algoritmo clasificador de figuras geométricas

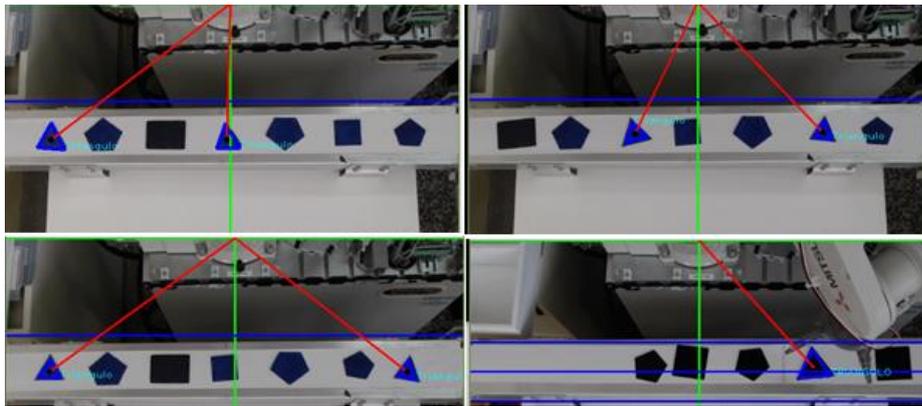
Para la clasificación de figuras geométricas se tomó en cuenta tres tipos, siendo estos cuadrados, triángulos y pentágonos, como se muestra en la figura 38.



**Figura 40.** Formas de figuras geométricas

- **Clasificación de figuras triangulares**

Para la evaluación del clasificador de triángulos, sobre la banda transportadora se ubicó figuras de diferente forma y posición, dentro de la cual, el algoritmo debe únicamente dibujar la forma de la figura triangular, como se muestra en la figura 39.



**Figura 41.** Clasificación de triángulos

Para corroborar la adecuada detección de triángulos dentro del AREA DETECCION de la banda transportadora, se hizo una serie de pruebas plasmadas en la siguiente tabla 13, en la cual se indica una muestra de 10, en las cuales se colocó entre 7 y 5 piezas de diferente forma, para verificar que el algoritmo es capaz de discriminar únicamente piezas triangulares y cada una con su respectiva coordenada (X, Y), para posicionamiento del brazo robótico.

**Tabla 13**

*Detección de triángulos*

N.º	N.º de piezas en banda	Piezas triangulares	Piezas triangulares Detectadas	Coordenada (X, Y)
1	7	2	2	-2.65, -315
2	7	2	2	-40,-297
3	5	1	1	80, -311
4	7	2	2	0, -324
5	5	2	2	-105, -315

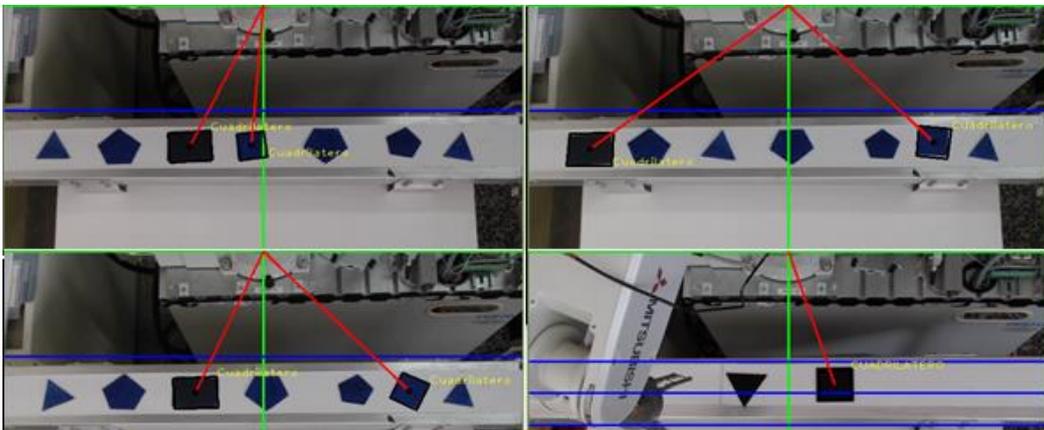
CONTINUA

6	7	1	1	197, -306
7	5	2	2	-167, -315
8	7	2	2	-40, -297
9	7	2	2	106, -309
10	5	1	1	-105, -315
<b>Total</b>	<b>62</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	
<b>T. Detectadas</b>			<b>17</b>	
<b>T. No detectadas</b>			<b>0</b>	
<b>Porcentaje</b>			<b>100%</b>	

De un conjunto de 62 piezas de diferente forma que contenía 17 figuras triangulares, las mismas se pudieron detectar de manera adecuada ya que se logró la clasificación del 100% de las piezas con sus respectivas coordenadas.

- **Clasificación de figuras cuadradas**

La evaluación del clasificador de cuadriláteros se realizó ubicando figuras de diferente forma y posición sobre la banda transportadora, donde el algoritmo debe únicamente dibujar la forma de la figura cuadrada, como se muestra en la figura 40.



**Figura 42.** Clasificación de cuadrados

La adecuada detección de cuadrados dentro de área de la banda transportadora se verifica, realizando pruebas de las cuales se indica en la tabla 14 una muestra de 10, en las cuales se colocó entre 7 y 5 piezas de diferente forma, para verificar que el

algoritmo es capaz de identificar únicamente piezas cuadrada y cada una con su respectiva coordenada (X, Y), para posicionamiento del brazo robótico.

**Tabla 14**

*Detección de figuras cuadradas*

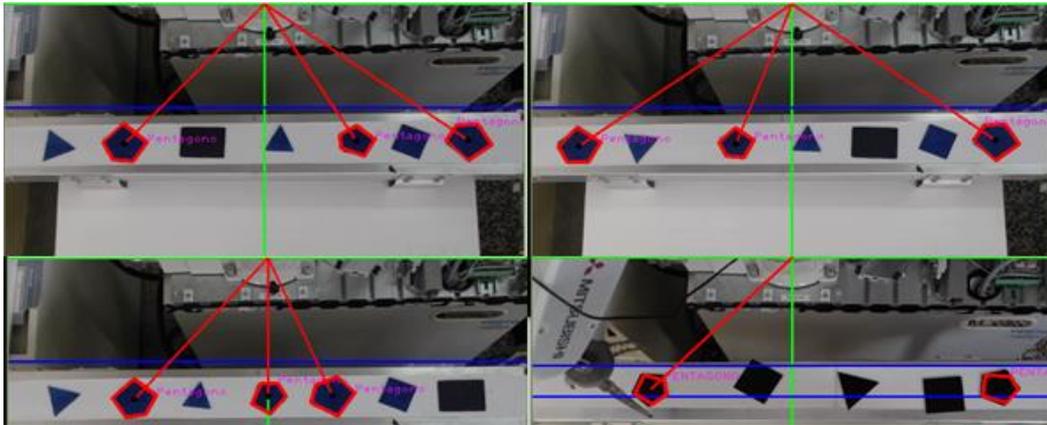
Nº	Nº de piezas en banda	Piezas triangulares	Piezas triangulares Detectadas	Coordenada (X,Y)
1	7	2	2	-142, -304
2	7	2	2	-20, -304
3	2	1	1	20, -313
4	7	2	2	77, -306
5	5	2	2	229, -311
6	2	1	1	226, -324
7	5	2	2	--82, -304
8	7	2	2	226, -324
9	7	2	2	110, -314
10	2	1	1	-162, -324
<b>Total</b>	<b>51</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	
<b>T. Detectadas</b>			<b>17</b>	
<b>T. No detectadas</b>			<b>0</b>	
<b>Porcentaje</b>			<b>100%</b>	

CONTINUA

Dadas 51 piezas de diferente forma (cuadrados, triángulos y pentágonos) de las cuales 17 figuras eran cuadradas, estas se pudieron detectar de manera correcta, ya que el total de figuras cuadradas fueron detectadas sin problema, resultando en un 100%, cabe recalcar que cada figura detectada presenta su respectiva coordenada (x, y).

- **Clasificación de pentágonos**

El clasificador de pentágonos se verificó poniendo varias piezas de diferente forma y posición, sobre la banda transportadora, para que el algoritmo identifique y dibuje únicamente la forma de la figura, siendo en este caso un pentágono, como se muestra en la figura 41.



**Figura 43.** Clasificación de pentágonos

En la siguiente tabla 15, se indica una muestra de 10 pruebas, en las cuales se colocó entre 7 y 5 piezas de diferente en la banda transportadora, para verificar que el algoritmo es capaz de identificar únicamente pentágonos y cada una con su respectiva coordenada (X, Y), para posicionamiento del brazo robótico.

**Tabla 15**

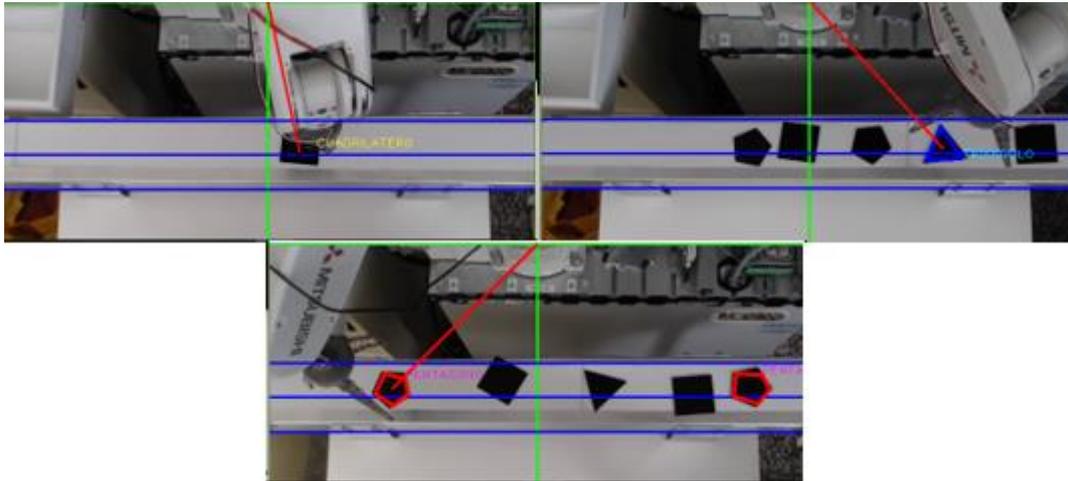
*Detección de pentágonos*

N.º de prueba	N.º de piezas en banda	Piezas pentágono	Piezas pentágono detectadas	Coordenada (X, Y)
1	7	3	3	236, -298
2	7	3	3	157, -293
3	5	2	2	-164, -307
4	7	3	3	-143, -311
5	5	2	2	-33, -313
6	5	1	1	-186, -304
7	5	2	2	-23, -326
8	7	2	2	173, -298
9	7	3	3	-146, -304
10	5	2	2	-170, -298
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	
<b>T. Detectadas</b>		<b>23</b>		
<b>T. No detectadas</b>		<b>0</b>		
<b>Porcentaje</b>		<b>100%</b>		

La detección de pentágonos se realizó de manera correcta ya que, de un total de 60 piezas de diferente forma, las cuales contenían 23 pentágonos, se pudo definir el total de pentágonos con el algoritmo clasificador, resultando en un porcentaje del 100% de la detección.

#### 4.5.4. Posicionamiento del Brazo robótico sobre las piezas

Una vez identificadas las piezas geométricas (cuadrado, triángulo y pentágono) y sus respectivas coordenadas (x, y), se procede a enviarlas al controlador del robot para que este se posicione sobre cada pieza, para su posterior recogimiento. En la siguiente figura 42 se puede apreciar el posicionamiento del brazo robótico, sobre las piezas, tomado en cuenta que da prioridad a las figuras geométricas más propensas a salir del rango de detección con respecto al eje **X** ( $\pm 275$ ) de la banda transportadora, como se puede observar en el caso del pentágono.



**Figura 44.** Posicionamiento del brazo robótico sobre cada figura geométrica

En la siguiente tabla 16 se indica las pruebas realizadas para cada figura geométrica, siendo **+**, el indicador para el correcto posicionamiento y **-** para un posicionamiento erróneo.

**Tabla 16***Posicionamiento del brazo robótico*

<b>N.º de Prueba</b>	<b>Triangulo</b>	<b>Cuadrado</b>	<b>Pentágono</b>
1	+	+	+
2	+	+	+
3	+	+	+
4	+	+	+
5	+	+	+
6	+	+	+
7	+	+	+
8	+	+	+
9	+	+	+
10	+	+	+
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>T Correcto</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>T Incorrecto</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Analizados los resultados de la tabla anterior se determina que el posicionamiento del Brazo robótico Mitsubishi MELFA, sobre las piezas geométricas, fue apropiado ya que la totalidad de las pruebas fueron acertadas, indicando un porcentaje del 100%.

#### **4.5.5. Compensación de coordenada X**

Al determinar el correcto posicionamiento del brazo robótico se debe calcular la compensación en el eje X, ya que la banda transportadora durante el proceso se encontrará en movimiento, por lo cual la coordenada X sufrirá una modificación.

Tabla 17.

*Compensación coordinada X de cada figura*

N.º de Prueba	Triangulo (mm)			Cuadrado (mm)			Pentágono (mm)		
	60	70	80	60	70	80	60	70	80
1	+	+	-	-	+	-	-	+	-
2	-	+	-	-	+	-	-	+	-
3	+	+	-	-	+	-	-	+	-
4	-	+	-	-	+	-	-	+	-
5	-	+	-	-	+	-	+	+	-
6	-	+	-	-	+	-	-	+	-
7	-	+	-	-	+	-	-	+	-
8	-	+	-	-	+	-	-	+	-
9	-	+	-	-	+	-	-	+	-
10	-	+	-	-	+	-	-	+	-
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>T. Adecuada</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>0</b>
<b>T. No adecuada</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>20%</b>	<b>100%</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>100%</b>	<b>0 %</b>	<b>10%</b>	<b>100%</b>	<b>0 %</b>

Recopilados los datos en la tabla anterior se observa que la cantidad de compensación adecuada para el eje X de cada figura es de 70 mm, ya que se posiciona correctamente el brazo robótico sobre la pieza mientras la banda transportadora está en movimiento como se muestra en la siguiente figura 43.



**Figura 45.** Posicionamiento compensado en X

#### 4.5.6. Distancia entre piezas

Indistintamente del tamaño y la forma que las piezas geométricas puedan tener, se establece una distancia adecuada entre piezas, para evitar posibles choques con el gripper mientras se realiza el proceso de posicionar, recoger y paletizar. En la siguiente tabla se indica valores de distancias que se usó, donde para identificar que dicha magnitud es adecuada se indica con un +, y con un -, para indicar que no es adecuada.

**Tabla 18**

*Distancia adecuada entre piezas*

N.º de prueba	Distancia (cm)		
	2	3	4
1	-	+	+
2	+	+	+
3	+	+	+
4	-	+	+
5	-	+	+
6	-	+	+
7	-	+	+
8	+	-	+
9	-	+	+
10	-	+	+
<b>Total</b>	10	10	10
<b>T. positivo</b>	3	9	10
<b>T. Negativo</b>	7	1	0
<b>Porcentaje</b>	<b>30%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>

Analizados los datos de la tabla anterior se indica que la distancia de dos centímetros no es adecuada con un porcentaje de 30, ya que mientras el brazo robótico está recogiendo la pieza detectada, la pieza contigua se sigue acercando y finalmente se colisionan. A partir de los 3cm, da un porcentaje alto que indica que la

distancia es adecuada para evitar choques entre piezas o con el gripper, en la figura 44 se indica la ubicación de las piezas a la distancia adecuada



**Figura 46.** Distancia adecuada entre piezas

#### 4.5.7. Prueba del sistema completo

Previo a la implementación del sistema general se evaluó la eficiencia de los algoritmos de clasificación de piezas geométricas y de detección de personas de forma individual, consiguiendo resultados favorables para ambos algoritmos. Finalmente se requiere acoplar cada parte para que trabajen en conjunto y establecer la implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico Melfa RV – 2SBD, mediante el uso de visión artificial para generación de trayectorias reconfigurables durante el proceso e incorporación de un sistema de seguridad activa. En la tabla 19 se muestra el resultado de la sinergia de los algoritmos de clasificación de piezas y detección de personas, donde el signo más (+) indica que se ha detectado una persona mientras se realiza el proceso de clasificación y paletizado, en tanto que, el signo menos (–), significa que no existe persona, durante el proceso de clasificación y paletizado.

**Tabla 19***Pruebas del sistema completo (clasificación de piezas y seguridad activa)*

<b>N.º de Prueba</b>	<b>Prueba con persona</b>	<b>Prueba sin persona</b>
1	+	-
2	+	-
3	+	-
4	+	-
5	-	-
6	+	-
7	+	+
8	-	-
9	+	-
10	+	+
11	+	-
12	+	-
13	+	-
14	+	-
15	+	-
16	+	-
17	+	-
18	+	+
19	+	-
20	+	-
<b>T detectado</b>	<b>18</b>	<b>3</b>
<b>T no detectado</b>	<b>2</b>	<b>17</b>
<b>Porcentaje</b>	<b>90%</b>	<b>15%</b>

Las pruebas realizadas, permiten garantizar que el sistema cumple con los requisitos de seguridad activa, mientras se desarrolla el proceso de clasificación y paletizado de piezas geométricas usando un brazo robótico Mitsubishi, cumpliendo lo siguiente:

- Detección de objetos (formas), y envío de sus datos de posición y orientación en movimiento sobre un sistema de transporte, para que el brazo robótico se posicione, recoja y paletice dicha pieza.
- Detección de personas, mientras se realiza el proceso de clasificación, recogimiento y paletizado de piezas geométricas.
- Sistema de seguridad activa en entornos industriales. Al implementar el sistema completo se obtuvo un 90% de eficacia, por lo tanto, cumple adecuadamente, con el fin de precautelar la seguridad del operador. Una vez detectada una persona dentro de la zona de seguridad del brazo robótico, este procede a detener completamente el proceso que se está llevando a cabo, caso contrario, el manipulador robótico realiza normalmente las tareas de posicionar, recoger y paletizar piezas geométricas.

#### 4.6. Validación de la hipótesis

***¿Es posible diseñar e implementar una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico, mediante visión artificial para generar trayectorias reconfigurables de posición y orientación en función de la ubicación del objeto, así como salvaguardar la seguridad del operador?***

En cuanto a la validación de la hipótesis, se usará la prueba de independencia del Chi cuadrado, la cual describe si existe o no relación entre variables, para lo cual es necesario plantear la hipótesis nula y la alternativa, donde la hipótesis nula establece que los dos parámetros utilizados son independientes el uno del otro, y la hipótesis alternativa asegura que los dos parámetros analizados son dependientes, dichas hipótesis se plantean continuación.

- $H_1$  (Hipótesis alternativa): es posible implementar una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico, mediante visión artificial para generar trayectorias reconfigurables de posición y orientación en función de la ubicación del objeto, así como salvaguardar la seguridad del operador.
- $H_0$  (Hipótesis nula): No es posible implementar una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico, mediante visión artificial para generar

trayectorias reconfigurables de posición y orientación en función de la ubicación del objeto, así como salvaguardar la seguridad del operador.

Bajo los resultados obtenidos en el capítulo de pruebas y resultados, con el fin de validar la hipótesis se procede al cálculo del Chi cuadrado.

**Tabla 20**  
*Datos chi-cuadrado hipótesis*

	Positivo	Negativo	Total
<b>Detección de Figuras</b>	20	0	<b>20</b>
<b>Detección de Seguimiento</b>	18	2	<b>20</b>
<b>Pruebas de posicionamiento</b>	20	0	<b>20</b>
<b>Total</b>	<b>58</b>	<b>2</b>	<b>60</b>

	F	Ft	f	Ft
0	<b>20</b>	19.333	3	<b>0</b> 51.58
1	<b>18</b>	19.33	4	<b>2</b> 6.27
2	<b>20</b>	21.86	5	<b>0</b> 3.13

$$x^2 = \sum_{i=0}^n \frac{(f - ft)^2}{ft}$$

$$x_{calc}^2 = 4.1379$$

Una vez realizada la validación del chi-cuadrado se debe comparar con la tabla teniendo en cuenta los grados de libertad y el porcentaje de error.

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271

**Figura 47.** Tabla del chi-cuadrado 2GDL y 5% error

$$x_{calc}^2 = 4.1379$$

$$xtbl^2 = 5.9915$$

$$xtbl^2 > xcalc^2 = Valida$$

$$4.1379 > 5.9915 = Valida$$

Al ser un sistema compuesto por varios subsistemas se debe realizar la comprobación de cada uno de estos para poder tener un promedio de efectividad de cada uno y así llevar a cabo una relación entre los subsistemas; realizados los cálculos tenemos un resultado del 4.1379 siendo menor que el de tabla que es 5.9915, el porcentaje de error es del 5% debido a las variaciones de luz, procesamiento de equipos de cómputo.

#### 4.7. Marco administrativo

Los aspectos administrativos y económicos del trabajo de titulación establecen parámetros relacionados con la viabilidad de los recursos y la factibilidad.

- **Factibilidad de la investigación**

Los recursos materiales y humanos son fundamentales para la realización del trabajo de titulación, pues permiten cumplir con éxito la investigación; siendo un aporte importante en investigaciones sobre el uso de robots para automatización de procesos en la industria.

Para lo cual es necesario plantear el presupuesto tomando en cuenta los parámetros tales como:

- **Recursos materiales**

Son los elementos que fueron utilizados en la ejecución del trabajo de investigación, los mismos que se detallan en la tabla 21.

- **Talento humano**

El personal que efectuó esta investigación está integrado por la Ing. María Fernanda Mogro Borja, con el asesoramiento del Ing. Darío Mendoza MSc.

**Tabla 21.***Talento humano.*

<b>Grupo de talento humano</b>	María Fernanda Mogro	Investigadora
	Ing. Darío Mendoza MSc.	Director del Proyecto de Titulación

- **Recursos financieros**

El financiamiento del trabajo de titulación es de recursos propios. El coste total utilizado para la implementación de una línea de clasificación robotizada es de \$ 1824,59, el mismo que se detalla en la tabla 21.

**Tabla 22.***Materiales e insumos.*

<b>Gatos generales</b>				
<b>N°</b>	<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Total</b>
1	Motor con caja reductora	1	27,31	27,31
2	Cámara LogiTech HD	2	89,99	179,98
3	Micro servo lineales Actuonix PQ12 – serie R	1	90,00	90,00
4	Arduino Uno	1	20,00	20,00
5	Extensiones USB	2	16,00	32,00
6	Cable Ethernet	1	6,00	6,00
7	Mesa para Banda	1	75,00	75,00
8	Caja para Paletizado	1	20,00	20,00
9	Cinta para Banda	1	3,00	3,00
10	Piezas Patrones	3	4,00	12,00
11	Tornillos M5	4	0,25	1,00
12	Tornillo M4	4	0,20	0,80
13	Elementos de electrónica básica	Varios	9,80	9,80
14	Gastos en paquetes de importación	1	75,00	75,00
15	Impresión 3D	1	100,50	100,50
	<b>SUBTOTAL</b>			<b>624,59</b>
17	Horas de ingeniería	100	12,00	1200,00
	<b>TOTAL</b>			<b>1824,59</b>

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Mediante la aplicación de visión artificial se logró generar trayectorias reconfigurables de acuerdo con la posición de los objetos a manipular, así como también un sistema de seguridad para los operarios humanos que permite el trabajo en conjunto entre operarios y robots en un ambiente industrial.
- El uso de un sistema de seguridad activa es de gran ayuda a la industria, porque al tener un algoritmo de reconocimiento de personas en un determinado espacio de trabajo, se puede evitar que el manipulador golpee al operador.
- Con el uso eficiente de un algoritmo de reconocimiento de personas como el de esta aplicación, se puede lograr la rehabilitación de varias celdas de trabajo que se encuentran en desuso por no tener las medidas de seguridad necesarias para el trabajo en conjunto con el operador.
- El uso de visión artificial para el reconocimiento de figuras geométricas tiene una efectividad del 93%, debido a que es vulnerable a los distintos cambios de luz.
- Cuando se generan trayectorias reconfigurables, se obtiene un alto grado de efectividad en el sistema de clasificación, lo cual ayuda a mejorar la productividad donde se aplique este método.
- La comunicación entre diferentes softwares debe ser lo más rápida posible, ya que el sistema de reconocimiento de imágenes envía coordenadas (OpenCv), para ser procesadas en un software de cálculo matemático (Matlab), las cuales deben enviarse al brazo robótico para que este se posicione en el menor tiempo posible sobre la pieza que debe recoger.
- El uso de un gripper adaptativo, facilita al momento de recoger las piezas, ya que las garras se deforman de acuerdo, a la forma de las piezas que va a ser recogidas.
- Al no tener una velocidad alta por parte del brazo robótico, se debe acondicionar la banda transportadora para que las piezas que vayan a ser

clasificadas tengan el tiempo suficiente al momento de recorrer desde el inicio hacia el final de esta.

- Cuando se realiza la conexión entre la computadora y las cámaras de adquisición de imágenes, se lo debe hacer con cables de extensión que contengan filtros, para que no existan interferencias de ruido al momento de la adquisición de imágenes, y se pueda realizar un mejor procesamiento.

## 5.2. Recomendaciones

- Antes de realizar cualquier operación con el brazo robótico se debe comprobar que las coordenadas de la posición de origen sean las correctas, ya que el controlador del brazo robótico tiende a perder las configuraciones iniciales, al pasar mucho tiempo desconectado de la red eléctrica.
- Para poder tener un óptimo funcionamiento del brazo robótico, se debe configurar sus topes mecánicos, pues al momento de realizar las diferentes pruebas, estos coincidan con los topes que se encuentran en la memoria del controlador.
- Se debe comprobar con ayuda del TeachBox, que la dirección IP y el puerto del controlador de brazo robótico sean los adecuados para tener una correcta comunicación entre los subsistemas.
- Cuando se realice la comunicación entre los diferentes subsistemas estos deben estar correctamente direccionados ya sea con sus puertos de comunicación o sus direcciones IP, sino la comunicación será nula ya sea entre los softwares de procesamiento o entre el software y el controlador de brazo robótico.
- Al momento de enviar las coordenadas de posicionamiento del brazo robótico se debe tener presente los ángulos máximos y mínimos de cada junta, porque de no hacerlo se puede causar daños irreparables.
- El uso de un computador de alto procesamiento es de gran importancia puesto que se necesita de manejo de dos softwares de alto consumo para el monitoreo y manejo de la línea de clasificación robotizada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Actuonix. (Septiembre de 2016). Micro actuadores lineales PQ12. En Actuonix. Recuperado el 10 de Marzo de 2018, de <https://s3.amazonaws.com/actuonix/Actuonix+PQ12+Datasheet.pdf>
- Amazon. (12 de Mayo de 2016). Recuperado el 10 de Marzo de 2018, de [https://www.amazon.com/gp/product/B01FJMHPY/ref=oh\\_aui\\_detailpage\\_o05\\_s00?ie=UTF8&psc=1](https://www.amazon.com/gp/product/B01FJMHPY/ref=oh_aui_detailpage_o05_s00?ie=UTF8&psc=1)
- Bulletin. (27 de Mayo de 2010). *infoPLC*. Recuperado el 15 de 01 de 2018, de <http://www.infoplcn.net/foro/showthread.php?3168-Mitsubishi-MELFA-RV-2SDB-nuevo-robot-multiejes-de-Mitsubishi-Electric-aumenta-la-fle>
- Cardona, S., & Clos, D. (15 de 04 de 2011). *Teoría de máquinas* (3 ed.). Barcelona: UPC. doi:B-32238-2008
- Carranza A. (10 de Septiembre de 2015). *Análisis cinemático y dinámico de pinza de robot para espacios aislados*. Recuperado el 10 de 12 de 2017, de Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid - Leganes
- CELI, C. (2017). *Diseño, desarrollo e implementación de un sistema adaptativo neurodifuso aplicado al brazo robot mitsubishi rv-2aj con visión artificial, utilizando un controlador basado en procesador arm*. quito: EPN.
- Creative Commons. (28 de 11 de 2016). *Ubuntu documentation*. Recuperado el 15 de Marzo de 2018, de OpenCV: <https://help.ubuntu.com/community/OpenCV>
- Festo. (2017). *MultiChoiceGripper*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2017, de <https://www.festo.com/group/en/cms/10221.htm>
- GamingPotion. (2017). *Mejores camaras web*. Recuperado el 13 de Marzo de 2018, de <http://gamingpotion.com/mejores-webcams/>
- Gonzales, V. (03 de Marzo de 2012). Recuperado el 16 de 01 de 2018, de [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/industrial.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/industrial.htm)

- Logitech. (2017). *Logitech*. Recuperado el 13 de Marzo de 2018, de Logitech: [http://support.logitech.com/es\\_es/product/hd-pro-webcam-c920/specs](http://support.logitech.com/es_es/product/hd-pro-webcam-c920/specs)
- M, P., & J, C. (2015). *Vison Artificial en robots ensambladores*. Madrid: Politecnica de Madrid.
- Maldonado, D., & Calderon, M. (2014). *Control de un cuadricoptero usando ROS*. Quito: Escuela Pólitecnica Nacional. Recuperado el 19 de Febrero de 2018
- Mathworks. (16 de 4 de 2018). *Mathworks*. Obtenido de Mathworks: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/tcpclient.html>
- Mathworks. (13 de 4 de 2018). *Mathworks*. Obtenido de Mathworks: [https://www.mathworks.com/help/matlab/import\\_export/create-a-tcpip-connection.html](https://www.mathworks.com/help/matlab/import_export/create-a-tcpip-connection.html)
- Mitsubishi Electrical. (25 de Mayo de 2017). *Manualzz*. Recuperado el 26 de 01 de 2018, de <http://manualzz.com/doc/8057169/the-automation-book-el-libro-de-la-automatizaci%C3%B3n-un-mund...>
- Mitsubishi Electrical. (25 de 05 de 2017). *Manualzz*. Recuperado el 26 de 01 de 2018, de <http://manualzz.com/doc/8057169/the-automation-book-el-libro-de-la-automatizaci%C3%B3n-un-mund...>
- Mitsubishi, E. (16 de 04 de 2018). *Mitsubishi Electric*. Obtenido de Mitsubishi Electric: <https://logismarketes.cdnwm.com/ip/mitsubishi-electric-europe-robots-de-brazo-articulado-robots-de-brazo-articulado-melfa-serie-rv-2sdb-632568.pdf>
- Ollero, A. (2001). *Robótica. Manipuladores y robots móviles*. España: Marcombo, Alfaomega. Recuperado el 05 de Diciembre de 2017
- OpenCV. (2015). *OpenCV 3.1.0*. Recuperado el 16 de Marzo de 2018, de Open Source Computer Vision: <http://docs.opencv.org/3.1.0/d1/dfb/intro.html>
- Pacun, P., & Jadlovský, J. (2015). Modelo matemático del robot Melfa RV - 2SDB. *Springer*, 145 - 154. Recuperado el 02 de Diciembre de 2017
- Proymec. (09 de Julio de 2014). *Cintas transportadoras en industria*. Recuperado el 11 de 12 de 2017, de <http://proymec.es/blog/cintas-transportadoras/>

- Ramirez, J. (05 de 2003). *Diseño de un efector final de ventosa por vacio*. Recuperado el 27 de 11 de 2017, de Mexico - Escuela Superior de Ingenieria Mecanica y Electrica
- Seitz, M. (17 de Marzo de 2017). *BBC Mundo*. Recuperado el 15 de 01 de 2018, de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39267567>
- Telégrafo, E. (17 de Febrero de 2014). *El Telégrafo*. Recuperado el 15 de 01 de 2018, de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/masqmenos-2/1/invencion-e-innovacion-ganan-terreno-en-el-ecuador>
- Torres, j. (12 de 4 de 2018). *Jesus Torres*. Obtenido de Jesus Torres: <https://medium.com/jmtorres/qt-network-b405a20edd4>
- Volusion. (19 de Julio de 2014). *Actuonix*. Recuperado el 10 de Marzo de 2018, de <http://www.actuonix.com/Actuonix-PQ12-R-micro-linear-servos-for-RC-p/pq12-r.htm>
- Waypart. (2015). Recuperado el 11 de Marzo de 2018, de <https://waypart.es/rodamientos/4295-rodamiento-609-2rs-diam-int-9mm-diam-ext-24mm-altura-7mm.html>