



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA
ROBÓTICA PARA PRUEBAS DE TÉCNICAS SOBRE VISIÓN
ARTIFICIAL QUE PERMITA EL APRENDIZAJE Y DESARROLLO DEL
SOFTWARE EN ROBOTS INTERACTIVOS**

**AUTORES: OCHOA ARIAS, CRISTIAN EMANUEL
TRÁVEZ ACUÑA, FREDDY SANTIAGO**

DIRECTOR: MSc.: LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2018



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA PRUEBAS DE TÉCNICAS SOBRE VISIÓN ARTIFICIAL QUE PERMITA EL APRENDIZAJE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE EN ROBOTS INTERACTIVOS" fue realizado por los señores Ochoa Arias Cristian Emanuel y Trávez Acuña Freddy Santiago, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de agosto del 2018


MSc. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE
DIRECTOR





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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Ochoa Arias Cristian Emanuel, con cédula de identidad N° 1725792889 y Trávez Acuña Freddy Santiago con cédula de identidad N° 1721876165, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA PRUEBAS DE TÉCNICAS SOBRE VISIÓN ARTIFICIAL QUE PERMITA EL APRENDIZAJE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE EN ROBOTS INTERACTIVOS" 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 declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 24 de agosto del 2018

Cristian Emanuel Ochoa Arias
CC. 1725792889

Freddy Santiago Trávez Acuña
CC. 1721876165



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Ochoa Arias Cristian Emanuel y Trávez Acuña Freddy Santiago, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA PRUEBAS DE TÉCNICAS SOBRE VISIÓN ARTIFICIAL QUE PERMITA EL APRENDIZAJE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE EN ROBOTS INTERACTIVOS" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad

Sangolquí, 17 de septiembre del 2018

Cristian Emanuel Ochoa Arias
CC. 1725792889

Freddy Santiago Trávez Acuña
CC. 1721876165

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedicamos principalmente a Dios Padre, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestras familias por su constante apoyo durante esta etapa académica.

Cristian y Freddy

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres por su constante apoyo a lo largo de toda nuestra carrera universitaria y a lo largo de nuestra vida. A todas las personas especiales que nos acompañaron en esta etapa, aportando a nuestra formación tanto profesional y como ser humano.

A nuestros hermanos que han sido el apoyo fundamental para lograr los objetivos propuestos, que siempre me dieron esperanzas y tuvieron fe en mí

De manera especial a nuestro tutor de tesis, por habernos guiado, en la elaboración de este trabajo de titulación con su constante ayuda y seguimiento.

A todos mis amigos que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad

Cristian y Freddy

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I	1
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Definición del Problema.....	3
1.3 Justificación e Importancia.....	4
1.4 Alcance.....	5
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.1 Objetivos específicos	7

1.6 Estructura del documento	8
CAPÍTULO II	10
ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Robótica social.....	10
2.1.1 Características de los robots interactivos.....	12
2.1.2 Clasificación de los robots interactivos	13
2.1.3 Aplicaciones de la robótica social.....	14
2.2 Sistemas de visión artificial aplicados a la robótica.....	15
2.2.1 Etapas de un sistema de visión artificial.....	16
2.2.2 Técnicas de visión artificial.....	18
2.3 Visión estereoscópica.....	29
2.3.1 Métodos para la obtención de la estructura de una escena.....	30
2.3.2 Proceso de la visión estereoscópica	30
2.3.3 Técnicas de Visión Artificial Estéreo	32
2.4 Resumen.....	34
CAPÍTULO III	36
DISEÑO DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA	36
3. 1 Metodología y diseño.....	36

3.1.1 Definición de necesidades	36
3.1.2 Definición de características técnicas	37
3.1.3 Matriz Quality Function Deployment (QFD)	38
3.2 Factibilidad y planeación	40
3.2.1 Estructura funcional	40
3.3 Módulo 1: Subsistema Mecánico	41
3.3.1 Mecanismo 3GDL.....	41
3.3.2 Actuador.....	42
3.3.3 Material de los ejes de la estructura.....	48
3.3.4 Material de los elementos de la estructura.....	67
3.3.5 Última etapa de diseño del subsistema mecánico.....	72
3.4 Módulo 2: Subsistema Electrónico	88
3.4.1 Medio de comunicación de datos	88
3.4.2 Dispositivo para representación de expresiones	88
3.4.3 Fuente de alimentación	89
3.5 Módulo 3: Subsistema de Control	89
3.5.1 Procesador	89
3.6 Módulo 4: Subsistema Visión	90

3.6.1 Sensor de la cámara.....	90
3.6.2 Software de procesamiento de imágenes.....	90
3.6.3 Sistema de visión artificial estéreo.....	90
3.7 Módulo 5: Subsistema Diseño de la carcasa.....	96
3.8 Módulo 6: Subsistema Diseño de la interfaz.....	98
CAPÍTULO IV.....	101
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	101
4.1 Construcción de la estructura del robot.....	101
4.2 Construcción de la carcasa del robot.....	105
4.3 Implementación de hardware de control.....	108
4.3.2 Instalación de dispositivos electrónicos.....	108
4.4 Pruebas y resultados.....	113
4.4.1 Desarrollo del protocolo de pruebas.....	113
4.4.2 Pruebas de iluminación en identificación de personas.....	118
4.4.2.2 Resultados de las pruebas de identificación de personas.....	122
4.4.3 Pruebas del Reconocimiento de expresiones faciales.....	123
4.4.4 Pruebas de Detección y seguimiento de objetos.....	124
4.4.5 Pruebas de Generación de mapa de disparidad.....	127

	x
4.5 Resumen.....	129
CAPÍTULO V.....	131
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	131
5.1 Conclusiones.....	131
5.2 Recomendaciones	132
5.3 Trabajos Futuros	133
BIBLIOGRAFÍA	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de los robots interactivos según Breazeal.</i>	13
Tabla 2 <i>Aplicaciones de los robots sociales.</i>	15
Tabla 3 <i>Métodos para el reconocimiento facial</i>	20
Tabla 4 <i>Métodos típicos utilizados para el reconocimiento de expresiones</i>	23
Tabla 5 <i>Técnicas de segmentación utilizadas para la detección de objetos</i>	26
Tabla 6 <i>Métodos para la obtención de la estructura de una escena</i>	30
Tabla 7 <i>Fases del proceso de Visión Estereoscópica</i>	31
Tabla 8 <i>Procedimiento para la obtención de imágenes</i>	32
Tabla 9 <i>Métodos para la generación del mapa de disparidad</i>	34
Tabla 10 <i>Requerimientos o necesidades del usuario.</i>	36
Tabla 11 <i>Características técnicas.</i>	37
Tabla 12 <i>Simbología.</i>	39
Tabla 13 <i>Resultados de la matriz QFD.</i>	39
Tabla 14 <i>Subsistemas y funciones,</i>	40
Tabla 15 <i>Elementos del mecanismo de 3GDL,</i>	43
Tabla 16 <i>Datos para dimensionamiento de motores</i>	46
Tabla 17 <i>Datos servomotor MG996</i>	48
Tabla 18 <i>Propiedad material ASTM A36</i>	48
Tabla 19 <i>Momento flexionante y Torsión</i>	50
Tabla 20 <i>Estimaciones de los factores de concentración del esfuerzo</i>	53

Tabla 21 <i>Momento flexionante y Torsión Eje cruceta X</i>	56
Tabla 22 <i>Momento flexionante y Torsión Rótula</i>	58
Tabla 23 <i>Diseño CAD estructura del robot</i>	67
Tabla 24 <i>Esfuerzo de Von Misses estructura del robot</i>	69
Tabla 25 <i>Desplazamiento estructura del robot</i>	70
Tabla 26 <i>Factor de seguridad estructura del robot</i>	71
Tabla 27 <i>Resultados análisis CAE</i>	72
Tabla 28 <i>Resumen de los parámetros D-H de la primera cadena base</i>	75
Tabla 29 <i>Resumen de los parámetros D-H de la cadena HGC</i>	79
Tabla 30 <i>Procedimiento para la selección de la fuente de alimentación</i>	89
Tabla 31 <i>Diseño de la cabeza del robot</i>	96
Tabla 32 <i>Diseño de la base</i>	97
Tabla 33 <i>Resultados análisis CAE</i>	98
Tabla 34 <i>Impresiones 3D de la estructura interna del Robot</i>	103
Tabla 35 <i>Impresiones 3D de la carcasa del Robot</i>	107
Tabla 36 <i>Protocolo de pruebas de iluminación de rostros</i>	114
Tabla 37 <i>Protocolo de pruebas de identificación de personas</i>	115
Tabla 38 <i>Protocolo de pruebas de reconocimiento de expresiones faciales</i>	116
Tabla 39 <i>Protocolo de pruebas de detección y seguimiento de objetos</i>	117
Tabla 40 <i>Protocolo de pruebas de generación de mapa de disparidad</i>	118
Tabla 41 <i>Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 1</i>	119
Tabla 42 <i>Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 2</i>	119

Tabla 43 <i>Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 3.</i>	120
Tabla 44 <i>Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 4.</i>	120
Tabla 45 <i>Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 5.</i>	120
Tabla 46 <i>Pruebas de la distancia de los usuarios.</i>	121
Tabla 47 <i>Pruebas de posición de los usuarios.</i>	121
Tabla 48 <i>Posición usuarios entre la distancia y el plano.</i>	122
Tabla 49 <i>Detección y seguimiento de objetos de color verde.</i>	125
Tabla 50 <i>Detección y seguimiento de objetos de color rojo.</i>	126
Tabla 51 <i>Detección y seguimiento de objetos de color rojo.</i>	126
Tabla 52 <i>Detección y seguimiento de objetos de color amarillo.</i>	126
Tabla 53 <i>Resumen sobre la detección y seguimiento de objetos.</i>	127
Tabla 54 <i>Errores en la medición de objetos</i>	128
Tabla 55 <i>Análisis de mapa de disparidad.</i>	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Robot social MAKI. Detección y seguimiento de un objeto.....	1
Figura 2 Robot interactivo "SAM"	2
Figura 3 Detección y seguimiento de rostros.....	3
Figura 4 Sistema robótico planteado.....	6
Figura 5 Funcionamiento del mecanismo de 3 GDL.....	6
Figura 6 Proyección de gestos con la matriz LED.....	7
Figura 7 Robot social NAO "Dancing with me".	11
Figura 8 Robot social Nancy.....	11
Figura 9 Robot Care-o-bot.....	14
Figura 10 Diagrama de bloques de las etapas de un sistema de visión artificial.....	16
Figura 11 Etapas de un sistema de visión artificial	18
Figura 12 Etapas del sistema de reconocimiento facial	19
Figura 13 Sistema de reconocimiento facial utilizado por el FBI	20
Figura 14 Etapas del reconocimiento de expresiones faciales	21
Figura 15 Aplicación "Face Reade" para reconocimiento de expresiones faciales. ...	22
Figura 16 Etapas del reconocimiento de objetos.....	25
Figura 17 Máscara de la imagen dividida en sus respectivos planos HSV	27
Figura 18 Imagen original filtrada en los planos HSV	28
Figura 19 Seguimiento de objetos o tracking.	29
Figura 20 Sistema de generación del mapa de disparidad.....	33
Figura 21 Etapas del proceso para la generación del mapa de disparidad	33

Figura 22 Matriz QFD.....	38
Figura 23 Mecanismo de 3GDL esquema general, diseño preliminar	42
Figura 24 Torque motor brazos X y Y.	43
Figura 25 Torque motor base móvil.....	45
Figura 26 Eje cruceta Y	49
Figura 27 Eje cruceta X	56
Figura 28 Momento flector eje rotula	57
Figura 29 Columnas 1 y 2	59
Figura 30 Propiedades de la sección circular.	61
Figura 31 Diagrama Esfuerzo vs radio de giro columna larga	61
Figura 32 Columna principal	63
Figura 33 Módulo de sección circular	64
Figura 34 Diagrama Esfuerzo vs radio de giro columna larga	65
Figura 35 Esquema robot	73
Figura 36 Cadena cinemática de la base.	75
Figura 37 Cadena cinemática HGC	78
Figura 38 Variables de la configuración diferencial para el modelamiento dinámico	82
Figura 39 Diseño carcasa.....	86
Figura 40 Partes diseño carcasa.....	87
Figura 41 Diseño estructura.....	87
Figura 42 Partes diseño estructura.....	88
Figura 43 Sistema de visión estereoscópico.....	91

Figura 44 Desplazamiento de altura h.....	91
Figura 45 Proyección de un punto en el sistema estéreo	93
Figura 46 Modelo pin-hole para el plano YZ	94
Figura 47 Escala y cambio de origen	95
Figura 48 Modelo de navegación de las ventanas.....	99
Figura 49 Diseño de plantilla.	99
Figura 50 Impresión 3D de la estructura interna del robot.....	101
Figura 51 Diagrama de flujo impresión 3D.	102
Figura 52 Diagrama de flujo maquinado ejes.....	104
Figura 53 Ensamble de la estructura interna.	105
Figura 54 Instalación de los acoples.	105
Figura 55 Diagrama de flujo implementación carcasa robot	106
Figura 56 Impresión 3D de la estructura externa del robot.....	106
Figura 57 Diagrama de flujo conexiones componentes electrónica	108
Figura 58 Esquema de conexión de la tarjeta de control.....	109
Figura 59 Instalación de las cámaras.....	110
Figura 60 Líneas de código para la calibración de las cámaras.....	110
Figura 61 Tablero de ajedrez para calibración de cámaras.	111
Figura 62 Obtención de muestras aleatorias.	111
Figura 63 Obtención de muestras aleatorias.	111
Figura 64 Coordenadas en pixeles y reales del objeto.	112
Figura 65 Instalación de las matrices led y cámaras.....	112

Figura 66 Reconocimiento de rostros - Iluminación al 100%.	122
Figura 67 Reconocimiento de rostros – Iluminación al 0%.....	123
Figura 68 Reconocimiento de rostros varios usuarios.....	123
Figura 69 Entrenamiento con tensorflow	124
Figura 70 Prueba de reconocimiento de expresiones.	124
Figura 71 Detección de objetos por color	125
Figura 72 Prueba de disparidad.	127
Figura 73 Distancia de objetos.	128

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye un prototipo de plataforma robótica para pruebas de técnicas sobre visión artificial, cuyo objetivo es servir como herramienta en el aprendizaje y desarrollo del software de robots interactivos. El documento da inicio con la descripción de conceptos generales de robótica, robótica interactiva y visión artificial. Incluso se estudia varias técnicas de visión artificial que se utilizan en el desarrollo de un robot interactivo, donde el principal objetivo es obtener información de su entorno, permitiendo la posterior implementación en la plataforma. A continuación, se realiza el diseño de los subsistemas y se estudia las alternativas existentes para seleccionar la mejor, que cumpla con las especificaciones técnicas planteadas en los requerimientos del usuario. Además, se implementan los subsistemas establecidos tanto en la parte mecánica, electrónica y de control, para finalmente integrarlas en la implementación del sistema de visión artificial. Finalizada la construcción de la plataforma e implementada las técnicas de visión artificial para identificación de personas, detección de expresiones faciales, detección y seguimiento de objetos y un algoritmo de visión artificial estereoscópica para estimar la distancia de un objeto a la plataforma, se realiza la etapa de pruebas de cada subsistema de forma individual y también del sistema integrado. Adicional, se realiza un análisis de resultados, lo que permite realizar un seguimiento del correcto funcionamiento del prototipo. El trabajo culmina con las conclusiones desarrolladas a lo largo de la investigación, recomendaciones para el correcto funcionamiento del prototipo y propuestas de futuros trabajos que impliquen mejoras e innovaciones del presente proyecto.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBOT INTERACTIVO**
- **TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL**
- **SISTEMA INTEGRADO**
- **PROTOTIPO**

ABSTRACT

In the present work a robotic platform is designed and built for being able to realize artificial vision tests, the main objective of the robot is to serve as learning tools and as a mean to develop interactive robots software. The first point shown in this document is a general description of robotics, interactive robotic and artificial vision. Also, several artificial vision techniques are shown that are used in the development of interactive robots where the main objective is to obtain information of its surroundings, allowing a post- implementation of the platform. The next step is the subsystems design and the study of the available alternatives for a better selection in the same, which satisfies the technical specifications required by the user. Also control, electronic and mechanical subsystems established are implemented for finally being able to integrate them in the implementation of the artificial vision system. When the construction of the platform is finally over, different techniques of artificial vision such as face recognition, expression detector, detection and tracking objects in movement and lastly a algorithm that can identify the distance between an object and the platform, are installed in the robot. Next, a test period is performed in all of the subsystems individually and integrated as a whole. Finally, the work ends whit the conclusions developed through the research, recommendations are also shown for the correct working of the prototype and futures project proposals involving improvements and innovations of the present project

KEYWORDS:

- **INTERACTIVE ROBOT**
- **ARTIFICIAL VISION TECHNIQUES**
- **EMBEDDED SYSTEM**
- **PROTOTYPE**

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 Introducción

La robótica social se desarrolló con la finalidad que el ser humano pueda comunicarse e interactuar con los robots. En la actualidad, los investigadores buscan desarrollar robots que puedan ser insertados en el entorno social: funciones asistenciales, urbanas, de servicios, etc., cumpliendo ciertos comportamientos y normas sociales que le permitan interactuar de manera adecuada con el ser humano y realizar actividades que se encaminan principalmente en ayudar al ser humano en diferentes áreas de la vida cotidiana (Vincent, Taipale, Sapio, & Fortunati, 2015).

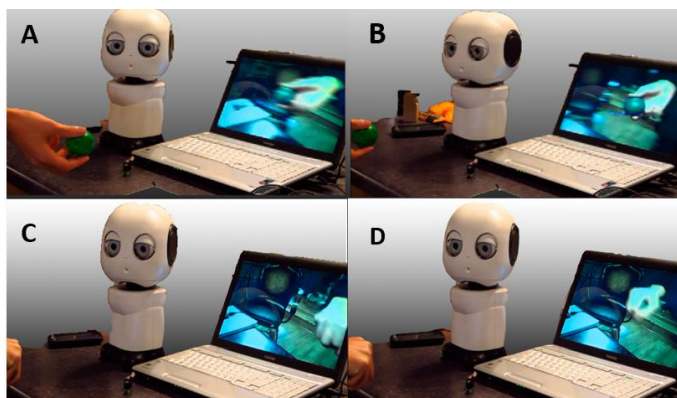


Figura 1 Robot social MAKI. (A) y (B) detección y seguimiento de un objeto, (C) y (D) seguimiento detenido.

Fuente: (kickstarter, 2017)

A nivel mundial se han realizado diversas investigaciones en el campo de la robótica social, donde se destaca el desarrollo del robot “MAKI” (kickstarter, 2017), un robot de

bajo costo que consiste en una plataforma de código abierto para que investigadores puedan desarrollar y compartir aplicaciones. Además, su diseño es modular, permitiendo que sus partes puedan ser fácilmente reemplazadas o actualizadas. Una de las tareas que puede realizar MAKI es el seguimiento de objetos, mostrado en la Figura 1.

En Ecuador, en la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca se ha desarrollado un robot interactivo denominado "SAM" (Gente, 2014), cuyo nombre corresponde a las siglas de Sistema Autónomo de Apoyo al Adulto Mayor. El robot cuenta con un sistema de reconocimiento de imágenes utilizando una cámara ubicada en su cabeza, adicionalmente puede reconocer comandos de voz a través de un micrófono instalado en su base como se puede ver en la Figura 2.



Figura 2 Robot interactivo "SAM"

Fuente: (Universidad Politécnica Salesiana, 2014)

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se han realizado varios proyectos en el campo de la robótica social para incentivar la investigación, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías en el país. Los proyectos desarrollados se denominan "Diseño y construcción de un robot interactivo para el tratamiento de personas

con el trastorno del espectro autista (TEA)” (Rubio, 2016) y “Diseño y construcción de un robot social para interacción hombre máquina” (Mejia & Nuñez, 2016), el cual realiza como una de sus tareas la detección y seguimiento de rostros. Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 3.



Figura 3 Detección y seguimiento de rostros

Fuente: (Mejia & Nuñez, 2016)

El presente proyecto propone el diseño y construcción de una plataforma robótica social, que presenta funciones de detección y seguimiento de objetos, reconocimiento de rostros y de expresiones faciales para la interacción con el ser humano.

1.2 Definición del Problema

En Ecuador el desarrollo de aplicaciones en robots sociales que utilizan visión artificial es limitado, debido a que no existen plataformas que permitan al usuario familiarizarse con los algoritmos de visión artificial existentes. Por lo cual, la investigación en los campos de la inteligencia artificial aplicada a la robótica social no ha logrado un progreso significativo en los últimos años.

Otro inconveniente presentado para el progreso de la visión artificial en Ecuador es la falta de laboratorios que dispongan de plataformas robóticas, las cuales permitan aprender y generar nuevos algoritmos. Por lo que su desarrollo implica mayor inversión de recursos económicos y tiempo.

Con la finalidad de satisfacer las necesidades con respecto a dispositivos que permitan vincular a la sociedad con el desarrollo de robótica social y visión artificial, se pretende implementar el prototipo planteado para fomentar la investigación, el aprendizaje y el uso de nuevas técnicas orientadas a la visión artificial.

El proyecto está dirigido a estudiantes e investigadores que se dediquen al desarrollo de algoritmos de visión artificial aplicados a la robótica social, los cuales actualmente no disponen de una herramienta que facilite el uso y difusión de dichos algoritmos.

1.3 Justificación e Importancia

La robótica ha ocupado un papel muy importante a lo largo de los últimos años debido al gran desarrollo y avance de la tecnología. Su objetivo principal es crear robots inteligentes y autónomos, capaces adoptar ciertos comportamientos para interactuar con su entorno siendo uno de sus propósitos primordiales la interacción con el ser humano.

Un robot social es aquel que interactúa con las personas siguiendo comportamientos, patrones y normas sociales (MEGATENDENCIAS, 2008). La implementación de sistemas de visión artificial es la herramienta más utilizada en robots sociales para el reconocimiento de su entorno. Por tanto, se origina la necesidad de crear un equipo que

facilite la comprensión y utilización de los algoritmos existentes e incluso permitan fomentar el desarrollo de nuevos algoritmos. La implementación de la plataforma robótica social es un gran aporte a la investigación, debido a que favorece la difusión de los métodos y técnicas de visión artificial para posteriormente seleccionar aquella que mejor se adapte a nuevos proyectos, incrementando la calidad y disminuyendo los costos de producción.

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación propone una herramienta pedagógica útil para la enseñanza en la rama de inteligencia artificial dentro del área de la robótica, así como facilitar el aprendizaje y desarrollo del software para robots interactivos.

1.4 Alcance

Con la implementación del proyecto se plantea la inclusión de sistemas que permitan el desarrollo de aplicaciones tanto en el campo de la robótica social, como en la visión artificial. En la Figura 4 se indica el sistema robótico planteado, el cual consta de tres partes: plataforma robótica, tarjeta encargada de controlar los actuadores y finalmente el control y procesamiento de señales.

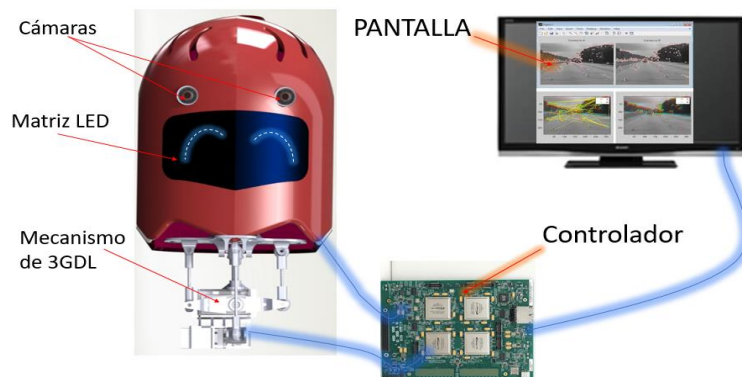


Figura 4 Sistema robótico planteado

La plataforma robótica cuenta con una estructura mecánica conformada por un mecanismo de 3 GDL que permite el movimiento en los ejes X, Y y Z a través de actuadores eléctricos como se muestra en la Figura 5. Además, dispone de un soporte denominado cabeza donde se encuentran los sensores ópticos y una matriz LED que es usada para la representación de los diferentes estados de ánimo que se desea transmitir como: ira, indiferencia, tristeza como se indica en la Figura 6.



Figura 5 Funcionamiento del mecanismo de 3 GDL. (a) Movimiento en el eje Z, (b) Movimiento en el eje X, (c) Movimiento en el eje Y

El dispositivo dispone de técnicas de visión artificial implementadas como: identificación de personas, reconocimiento de expresiones faciales, detección y seguimiento de objetos, localización de objetos en el espacio. Las cuales son

desarrolladas por medio del reconocimiento de patrones, aprendizaje estadístico, geometría de proyecciones, procesamiento de imágenes, teoría de gráficos y demás técnicas (Hernández, 2007). Al trabajar las técnicas de visión artificial en conjunto con la estructura mecánica de la plataforma robótica, el investigador puede desarrollar e implementar nuevas aplicaciones para la robótica social y así brindar una mejor interacción entre el robot y el usuario.



Figura 6 Proyección de gestos con la matriz LED

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar y construir una plataforma robótica para pruebas de técnicas sobre visión artificial que permita el aprendizaje y desarrollo del software de robots interactivos.

1.5.1 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar una plataforma robótica utilizando un mecanismo de tres grados de libertad que permita manipular los movimientos del robot.
- Implementar un sistema de visión artificial para realizar tareas de reconocimiento facial, detección y seguimiento de objetos para su interacción con el ser humano.

- Desarrollar un algoritmo para la implementación de visión estereoscópica que permita al robot proyectar el mapa de disparidad y estimación de la distancia a la que se encuentra un objeto.
- Verificar el funcionamiento del robot a través del desarrollo de protocolos de pruebas y su inserción en el entorno social.

1.6 Estructura del documento

El presente proyecto se encuentra estructurado en seis capítulos donde se describe el diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica para pruebas de técnicas sobre visión artificial.

Los primeros capítulos se enfocan en el estudio de conceptos generales de robótica interactiva y visión artificial. Además, se realiza un análisis a profundidad de las diferentes técnicas de visión artificial que son utilizadas para el desarrollo de robots sociales.

En el capítulo 3 se ejecuta el diseño de los subsistemas para lo cual se estudia las alternativas existentes, permitiendo determinar la mejor opción que cumpla con las especificaciones técnicas planteadas en base a los requerimientos del usuario. Además, se procede con la implementación de los subsistemas establecidos tanto en la parte mecánica, electrónica y de control, para finalmente integrarlas en la implementación del prototipo.

En el capítulo 4 se procede a describir la etapa de pruebas de cada subsistema de forma individual y en el sistema integrado. Adicionalmente, se realiza un análisis de resultados, lo que permite hacer un seguimiento del correcto funcionamiento del prototipo, ejecutando un control de calidad que cumpla con los parámetros establecidos de diseño.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones desarrolladas a lo largo de la investigación, recomendaciones para el correcto funcionamiento del prototipo y propuestas de futuros trabajos que impliquen mejoras e innovaciones del presente proyecto.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se estudia los aspectos teóricos acerca de la robótica social, sus objetivos, clasificación y sus aplicaciones. Adicionalmente se describe las generalidades de la visión artificial y sus aplicaciones, visión estereoscópica, métodos y algoritmos implementados en las técnicas desarrolladas para el proyecto.

2.1 Robótica social

La robótica social estudia la interacción entre robots y seres humanos, así como la comunicación entre ellos, tomando en cuenta comportamientos, patrones y normas que rigen en la sociedad en la cual se desenvuelven. Dentro del área de investigación de la robótica social se menciona la interacción hombre-máquina (HMI) e interacción robot-robot, aceptación social, impacto de los robots en la sociedad y robótica de asistencia social (García A. , 2015).

Los robots sociales fueron creados con la finalidad de ser insertados en el entorno social para realizar actividades como cuidado de enfermos, tareas domésticas, servicio al cliente, entretenimiento y aplicaciones en general en las cuales se tenga la necesidad de interacción con el ser humano.



Figura 7 Robot social NAO “Dancing with me”.

Fuente: (Ryo & Lee, 2016)

En Japón, en la Universidad de Chubu fue desarrollada una investigación denominada “Robot-play Therapy for Improving Prosocial Behaviours in Children with Autism Spectrum Disorders” (Ryo & Lee, 2016), donde se analiza la implementación de un robot social “NAO” como herramienta para el tratamiento de niños con trastorno del espectro autista, a través de juegos musicales denominados: “Touch Body” y “Dancing with Me” (Ver Figura 7), permitiendo evaluar la comprensión y comportamiento prosocial de los niños mediante el reconocimiento de expresiones faciales, posturas y gestos.

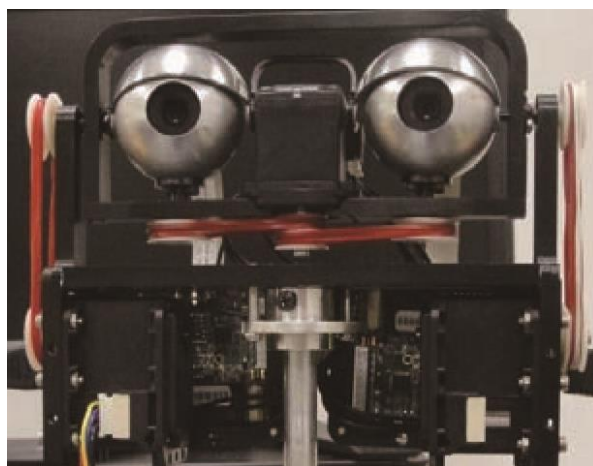


Figura 8 Robot social Nancy

Fuente: (Cabibihan, y otros, 2011)

En el artículo de título “Design and Development of Nancy, a Social Robot” realizado por Cabibihan, Zhang, Meng, Safizadeh, y Yang; se desarrolló un robot (ver Figura 8) como plataforma para la interacción social. El robot tiene 32 grados de libertad (DOF) y un nivel de inteligencia que se implementa en base a los subsistemas de visión, audio y control. Las tareas de visión básica que se utilizan cubren los siguientes aspectos: identificación de objetos o personas en una base de datos, rastreo de un objeto o persona, reconocimiento de gestos y movimientos para interacción, y comprensión de expresiones faciales.

2.1.1 Características de los robots interactivos

Un robot social es aquel que interactúa y se comunica con las personas, las características de un robot social varían de acuerdo con la aplicación y necesidades del usuario. Un robot interactivo puede ser identificado por los siguientes aspectos que se enlistan a continuación (Norskov, 2016):

- **Apariencia agradable:** es una de las principales características, debido a que define el grado de aceptación del usuario y el posible impacto que tendrá el producto en el mercado.
- **Inteligencia social:** es una habilidad que debe disponer el robot para establecer la interacción con el usuario.
- **Personalidad:** es importante que el robot cuente con una “personalidad” distintiva y convincente, de manera que una persona esté dispuesta a interactuar con él. En definitiva, la personalidad de un robot puede proporcionar información útil sobre el usuario, como el estado de ánimo e incluso modificarlo.
- **Comunicación sencilla y agradable:** lo que permitirá al usuario sentir comodidad al momento de establecer la interacción con el robot.

2.1.2 Clasificación de los robots interactivos

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de los robots interactivos de acuerdo con lo establecido por Breazeal en uno de sus artículos, se pueden dividir en cuatro grupos, tomando en cuenta la complejidad del entorno donde se efectúa la interacción.

Tabla 1

Clasificación de los robots interactivos según Breazeal.

Robot interactivo	Descripción
Robots Evocativos	Son aquellos que cuentan con características físicas similares a un ser vivo para animar a las personas a interactuar con la tecnología proyectando confianza al humano. Uno ejemplo es el perro robot Aibo, sus principales funciones son reconocimiento de voz, detección y reconocimiento facial. (SONY Corporation, 2017).
Robots de Interfaz	Son robots que utilizan un modo de comunicación tipo humano para facilitar la interacción con las personas. Un ejemplo que se destacada es el robot “Rhino” desarrollado en el artículo de título “The Interactive Museum Tour -Guide Robot”. La tarea principal del robot era proporcionar visitas interactivas a los visitantes del museo (Burgard, y otros, 1998).
Robots Receptivos	Es un tipo de robot que aprende a través del entrenamiento ya sea del movimiento o del habla. Responden a estímulos que las personas utilizan para interactuar con ellos. Por ejemplo, el robot “Pepper” el cual consiste en un torso de un humanoide montado en una plataforma móvil, desarrollado por las compañías Aldebaran Robotics y SoftBank (SoftBank, 2014).
Robots Sociables	Son aquellos con sus propias metas y motivaciones internas. Tratan de involucrar a las personas de una manera social no solo para el beneficio de estas, sino para beneficiarse ellos mismos. En el artículo de título “Interactive Robotic Framework for Multi-sensory Therapy for Children with Autism Spectrum Disorder” desarrollado por Bevill, Park se desarrolló un robot para la terapia multisensorial para niños con trastornos del espectro autista. Basado en emociones y expresiones faciales, así como un sistema de monitoreo basado en la visión y el audio para la medición cuantitativa de la reacción del paciente (Bevill & Park, 2016).

2.1.3 Aplicaciones de la robótica social

En las últimas décadas los robots sociales han tenido una gran acogida en diferentes escenarios (hogar (Ver Figura 9), hospitales, museos, etc.) realizando aplicaciones de acuerdo con las necesidades del usuario como vigilancia, seguridad, rehabilitación, y como herramienta en el tratamiento de pacientes con Parkinson, depresión, trastornos mentales (Nuñez, Bustos, García, & Jaramillo, 2011). En la Tabla 2 se enlistan las aplicaciones más relevantes para robots sociales.



Figura 9 Robot Care-o-bot

Fuente: (Fraunhofer IPA, 2016)

Tabla 2*Aplicaciones de los robots sociales.*

Aplicación	Características
Robot doméstico	<ul style="list-style-type: none"> -Creado para ser utilizado en lugares cerrados - Imita funciones de un acompañante -Realiza tareas como: entretenimiento de niños y adultos, control de encendido y apagado de dispositivos eléctricos, monitoreo remoto.
Robots educativos	<ul style="list-style-type: none"> - Su implementación mejora el rendimiento y aumenta el interés de los estudiantes - Aspecto e interfaz amigable con el usuario - Flexibilidad de reprogramación
Robots terapeutas	<ul style="list-style-type: none"> - Herramienta para el tratamiento de personas con trastornos mentales, depresión, autismo y adultos mayores. - Mejoran la relación entre terapeuta y paciente - Ayudan a obtener información certera que permite llevar mejor el tratamiento
Robots asistentes	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizados en personas dependientes como niños, ancianos y discapacitados. - Ayudan a las personas a realizar diversas tareas

2.2 Sistemas de visión artificial aplicados a la robótica

Los sistemas de visión artificial permiten al robot percibir la estructura y características físicas y visuales de un entorno estático o dinámico, a partir del procesamiento digital de una o varias imágenes bidimensionales del mismo. Las principales características que se requiere percibir a través de la visión artificial suelen ser formas, tamaños, localización de objetos, color, iluminación, textura y composición (Monsó, 2001).

2.2.1 Etapas de un sistema de visión artificial

En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de visión artificial.

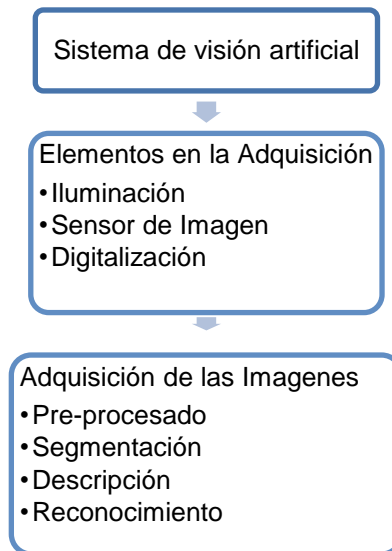


Figura 10 Diagrama de bloques de las etapas de un sistema de visión artificial

Fuente: (Departamento de Electrónica, 2015)

2.2.1.1 Elementos en la Adquisición de la imagen

El sistema permite la captura o adquisición de la imagen digital, por medio del sensor óptico (cámara), considerando el sistema de iluminación como un elemento principal.

- Iluminación: es uno de los elementos más importantes en lo que es visión artificial, se debe tomar en cuenta los siguientes factores: intensidad lumínica, duración, tiempo de respuesta, requerimientos de refrigeración, costo y flexibilidad de diseño.
- Sensor de imagen: se utiliza para captar la luz y convertirla en una imagen digital equilibrada en ruido, sensibilidad y margen dinámico.
- Digitalización: convierte la salida del dispositivo físico de sensor a forma digital.

2.2.1.2 Adquisición de la imagen

Para el análisis de la imagen se llevan a cabo las subetapas que se describen a continuación:

- **Preprocesamiento de la imagen:** se transforma la imagen original para facilitar y simplificar fases posteriores del análisis como: mejora de calidad y adaptación a la fase de extracción de características, corrección de iluminación y reducción de ruido.
- **Segmentación:** es una fase fundamental en el procesamiento de cualquier sistema de visión artificial. El propósito de esta etapa es descomponer la imagen en partes que tiene significado con respecto a una aplicación particular.
- **Descripción:** es un modelo que representa las características de a imagen de relevancia. Los modelos se obtienen a partir de imágenes previamente segmentadas y analizadas, estos describen una imagen puede ser estadística, estructurales, etc. En una base de datos de la memoria del procesador, se registran las características de relevancia de la imagen.
- **Reconocimiento:** consiste en la clasificación de los objetos presentes en la imagen, donde se identifica cada objeto de una escena y se le asigna una etiqueta.

En la Figura 11 se muestran la adquisición de la imagen de una granadilla en estado de maduras.

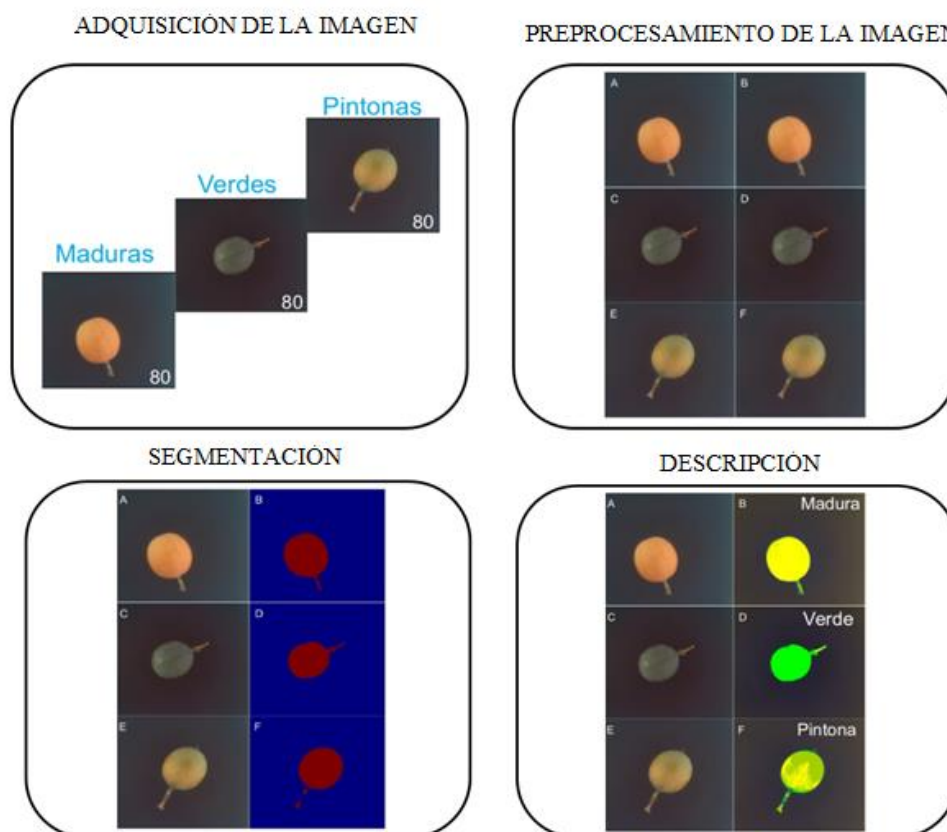


Figura 11 Etapas de un sistema de visión artificial para identificación del estado de madurez de granadillas

Fuente: (Escobar, 2016)

2.2.2 Técnicas de visión artificial

2.2.2.1 Identificación de rostros

El proceso para reconocimiento facial se inicia con la obtención de una o varias imágenes de una cara desconocida, posteriormente se extrae sus características para ser comparadas con rasgos de las caras almacenadas en una base de datos, aquella con mayor número de similitudes determinadas en un umbral (número mínimo de similitudes) es seleccionada, retornando la identidad de la misma (Vásquez López, 2014).

En la Figura 12 se observa un diagrama de bloques con las etapas del proceso para reconocimiento de rostros.

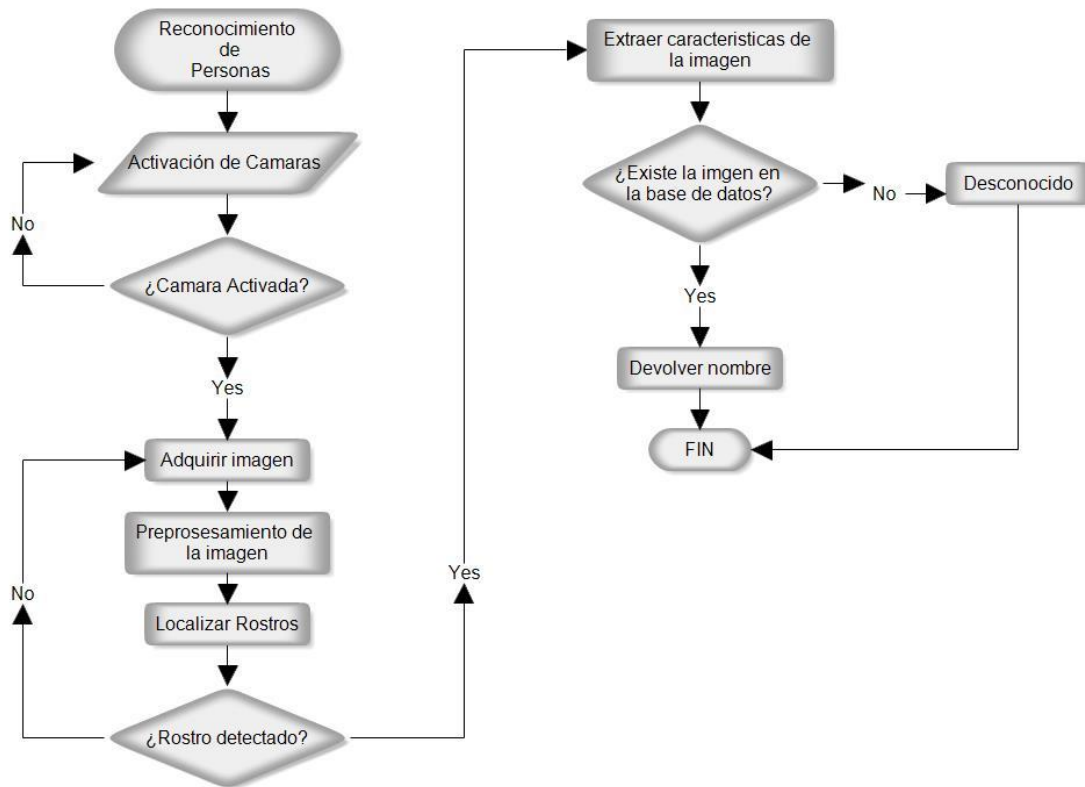


Figura 12 Etapas del sistema de reconocimiento facial

Fuente: (Moreno Díaz, 2004)

En la Figura 13 se observa una aplicación denominada “Next Generation Identification System”, desarrollada por el FBI para reconocimiento de rostros implementando sistemas de visión artificial para uso policial, de manera que se pueda reconocer fácilmente a las personas.



Figura 13 Sistema de reconocimiento facial utilizado por el FBI

Fuente: (García Y. , 2017)

En la Tabla 3 se describe algunos métodos para el reconocimiento facial (Vásquez López, 2014).

Tabla 3

Métodos para el reconocimiento facial

Método	Características
Análisis de componentes principales (PCA) (Domínguez Pavón, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> -Método estocástico no periódico -Utiliza matrices de covarianza cuyos autovalores representan los componentes principales comunes en imágenes de rostros -Se realiza el reconocimiento mediante un proceso de comparación
Análisis de características locales (LFA)	<ul style="list-style-type: none"> -Busca grupos de características correlacionadas -Robusto frente a variaciones de iluminación o perspectiva
Redes Neuronales	<ul style="list-style-type: none"> -Selecciona características simples que tengan buen poder discriminatorio -Utiliza redes de perceptrones multicapa -Busca construir un modelo a partir de un conjunto de datos de entrenamiento
Algoritmo genético ecléctico (AGE)	<ul style="list-style-type: none"> -Menor procesamiento de información -Selección de una muestra aleatoria de los píxeles de la imagen, cuidando de no obtener píxeles duplicados -Genera una función f que involucre los e patrones generales presentes en los datos de entrenamiento

2.2.2.2 Reconocimiento de expresiones faciales

En el reconocimiento de expresiones faciales se realiza el análisis utilizando un modelo particular o individualizado de la persona específica, de manera que se puedan interpretar sus gestos propios. Para el análisis de expresiones se utilizan elementos faciales como los ojos y la boca, debido a que su movimiento brinda una amplia información para reconocer y clasificar gestos.

En la Figura 14 se observa un diagrama de bloques con las etapas del proceso para reconocimiento de expresiones faciales.

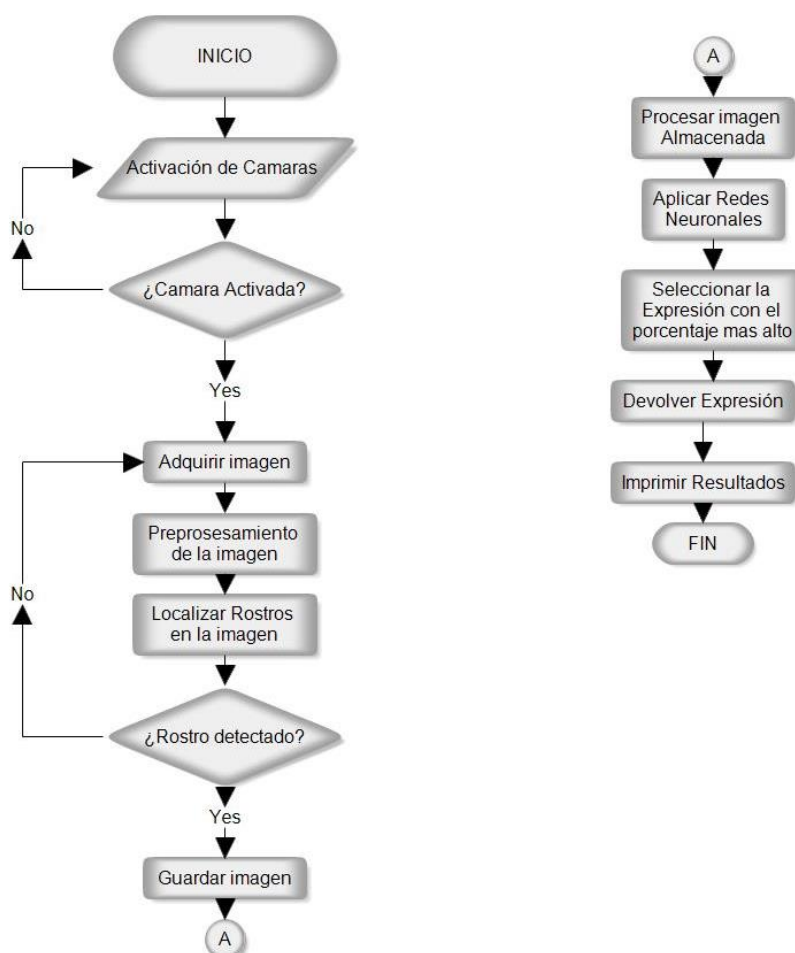


Figura 14 Etapas del reconocimiento de expresiones faciales

Fuente: (Moreno Díaz, 2004)

En la Figura 15 se observa la aplicación “Face Reader” (desarrollada por la empresa holandesa Noldus) que permite reconocer expresiones faciales, la cual es utilizada para investigación de la conducta, psicología, investigación de mercado, etc.

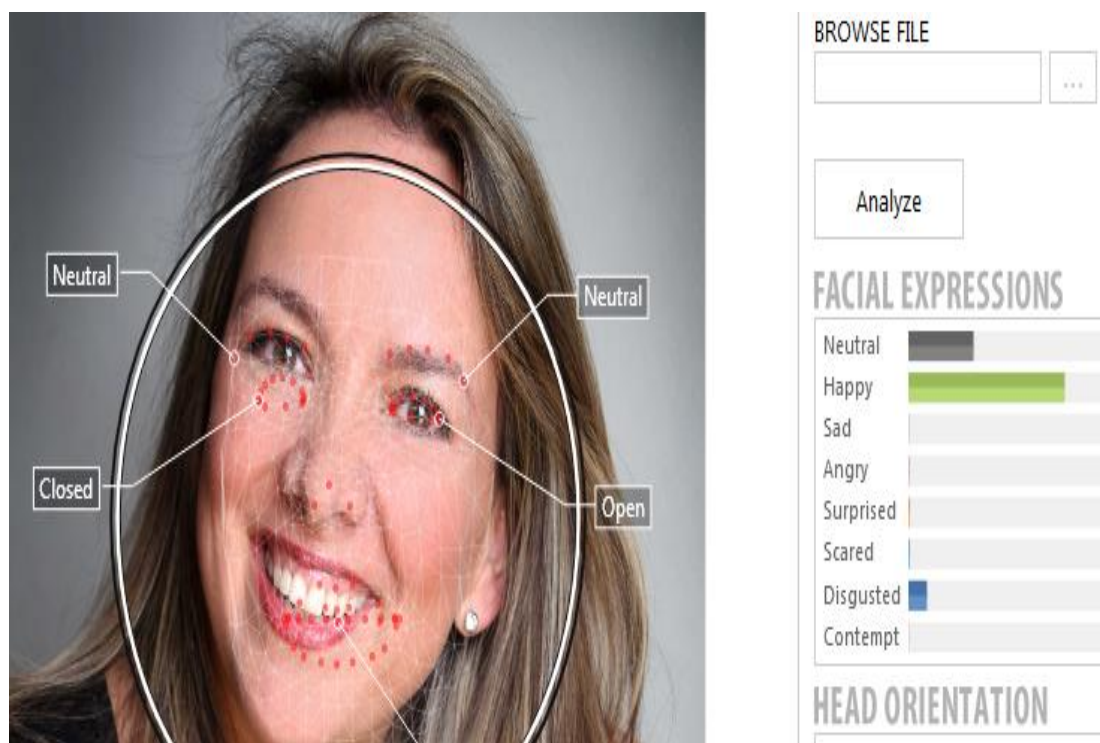


Figura 15 Aplicación “Face Reader” para reconocimiento de expresiones faciales.

Fuente: (Noldus Information Technology, 2017)

Existen varios sistemas de reconocimiento de expresiones que funcionan independientes de una persona en específico, pero se limitan al reconocimiento de pocas expresiones (Moreno Díaz, 2004).

En la Tabla 4 se muestra los métodos de reconocimiento de expresiones.

Tabla 4

Métodos típicos utilizados para el reconocimiento de expresiones faciales.

Método	Características
Análisis de músculos faciales	<ul style="list-style-type: none"> -Emplea modelos 3D o secuencias de video -Relaciona las expresiones faciales al movimiento de ciertos grupos de músculos
Redes neuronales	<ul style="list-style-type: none"> -Emplea imágenes faciales en 2D -Basado en rasgos locales -Utiliza Wavelets de Gabor para reducir la incertidumbre en la información obtenida -Utiliza un perceptrón multicapa
Descriptores de forma	<ul style="list-style-type: none"> -Extraen información en forma de datos numéricos, acerca de la geometría de un modelo en 3D -Tiene invarianza respecto a traslación, rotación, escala y reflexión -Calculan la distancia entre los vectores característicos de una imagen representativa para cada gesto y los vectores de una imagen neutra
Integrales proyectivas	<ul style="list-style-type: none"> -Analiza componentes concretos del rostro de forma separada -Define regiones específicas a cada elemento del rostro -Se requiere un conjunto de datos de entrenamiento para cada región -Utiliza imágenes estáticas o secuencia de video

2.2.2.3 Reconocimiento de objetos

La técnica de reconocimiento de objetos permite encontrar o identificar objetos en una imagen o secuencia de video. Para el reconocimiento de objetos mediante la implementación de sistemas de visión artificial es importante considerar factores externos que pueden afectar la calidad de los resultados como cambios en la iluminación y puntos de vista, escala, deformación o un fondo complejo. Por tanto, es importante procurar mantener un ambiente controlado (Universidad de Alicante, 2015). Las principales aplicaciones son:

- Recuento de objetos.
- Identificación de formas y colores.
- Medida de dimensiones.
- Detección de obstáculos para robots móviles.
- Aplicaciones industriales en general.

La capacidad de un robot para interactuar con el medio viene dada por la posibilidad de extraer información de su entorno, dicha información puede ser la detección de los objetos presentes a su alrededor. Por tanto, dotando al robot de un sistema de visión artificial para reconocimiento y seguimiento de objetos, se le confiere una mayor autonomía, otorgándole el poder de decisión para llevar a cabo sus actividades programadas.

En la Figura 16 se observa un diagrama de bloques con las etapas del proceso para reconocimiento de objetos.

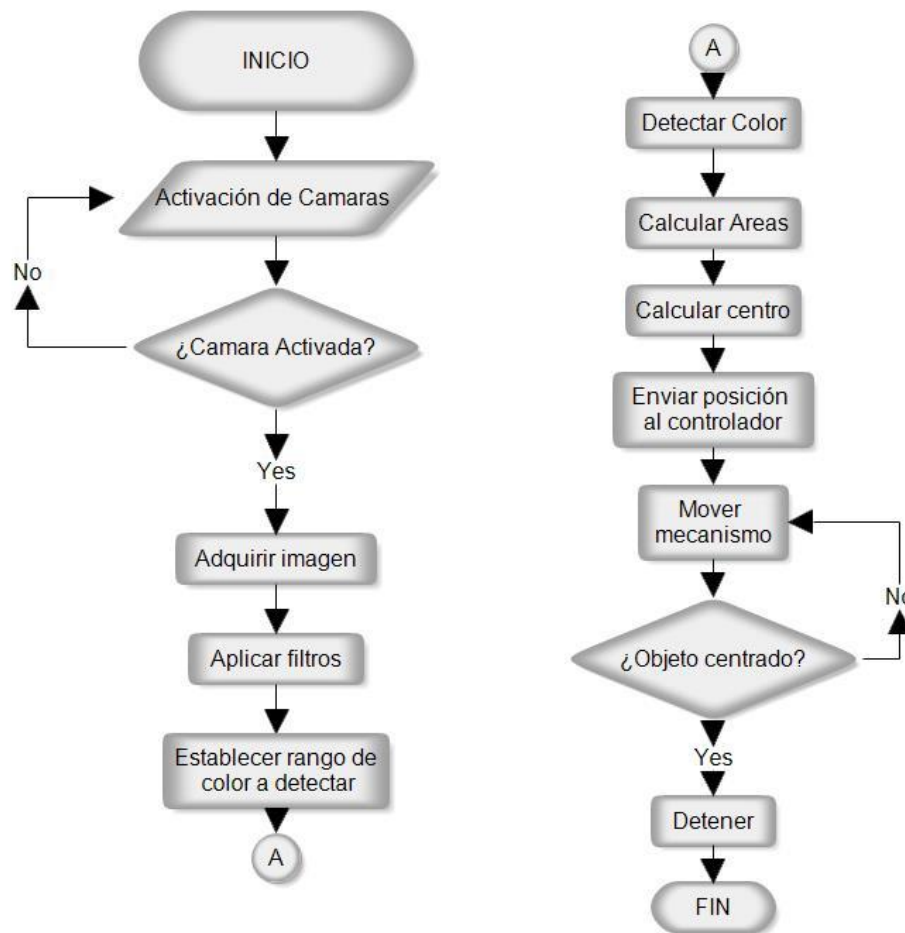


Figura 16 Etapas del reconocimiento de objetos

Fuente: (Moreno Díaz, 2004)

Actualmente se pueden distinguir dos metodologías principales para la detección de objetos:

- Basada en la transformación de la imagen mediante segmentaciones en esta metodología se realiza transformaciones a la imagen para ir sustrayendo información que resulte útil para su análisis.
- Haar Feature-based Cascade Classifier, esta metodología consiste en entrenar al sistema para que sea capaz de reconocer objetos en cualquier entorno y bajo cualquier circunstancia.

En la Tabla 5 se muestra las técnicas de segmentación para la detección de objetos

Tabla 5

Técnicas de segmentación utilizadas para la detección de objetos

Método	Características
Segmentación basada en umbralización	<ul style="list-style-type: none"> - El proceso de umbralización basada en el histograma consiste en agrupar los píxeles según sus niveles de intensidad luminosa. -Las condiciones de iluminación del fondo y del objeto deben ser homogéneas.
Segmentación basada en bordes	<ul style="list-style-type: none"> -Se basa en los bordes encontrados en la imagen por los detectores. - Se determina mediante la vecindad la pertenencia de un píxel a un borde, así se incrementa la calidad de los resultados.
Segmentación orientada a regiones	<ul style="list-style-type: none"> -Se basan en la construcción de las regiones directamente. -Cada una de las regiones resultantes de este tipo de segmentación han de ser homogéneas y maximales.
Segmentación por moción	<ul style="list-style-type: none"> -Se trata de un campo de la segmentación con mucho auge -Se basa en la comparación de varias imágenes tomadas en el tiempo por lo que se puede detectar el objeto en movimiento y sus características. Muy útil para aplicaciones en robótica y control de calidad.

Fuente: (Peña, 2010)

2.2.2.3.1 Detección de objetos mediante segmentaciones

La transformación de la imagen mediante segmentación requiere definir las características de identificación según las cuales se va a detectar los objetos, tales como color, dimensiones, forma, etc. Se utiliza el proceso de umbralización basada en un histograma, que consiste en agrupar los píxeles según sus niveles de intensidad luminosa.

El proceso inicia una vez que la imagen ha sido capturada, es importante destacar que, por defecto, la captura de la imagen de video está definida en la escala de colores RGB (Rojo- Verde- Azul). Por tanto es necesaria la creación de máscaras mediante umbralización basada en el color de cada uno de los canales del modelo HSV (Matiz- Saturación - Valor) como se observa en la Figura 17, debido a que permite realizar una segmentación más eficiente convirtiéndolo en un sistema robusto frente a cambios de luz (Pérez González, 2016). Para identificar los píxeles de un determinado color se comprueba que los niveles de sus tres componentes correspondan a los del color buscado.



Figura 17 Máscara de la imagen dividida en sus respectivos planos HSV

Fuente: (Peña, 2010)

A partir de cada una de las máscaras obtenidas se aplican funciones lógicas utilizando los rangos aceptados en cada uno de los planos de HSV, generalmente se emplea la función lógica AND. Una vez aplicada se obtiene una imagen filtrada como puede observarse en la Figura 18.

Posteriormente se realiza la conversión a imagen binaria para efectuar la segmentación y se aplican filtros que permitan minimizar el ruido, de manera que se obtenga un resultado más eficiente al aislar los objetos deseados del resto de la imagen



Figura 18 Imagen original filtrada en los planos HSV

Fuente: (Peña, 2010)

2.2.2.3.2 Seguimiento de objetos o Tracking

El seguimiento de objetos es un proceso de estimar la trayectoria de una o más objetos móviles mediante el uso de una cámara, se debe localizar primero un objeto en la escena y posteriormente seguirlo en el tiempo. Las principales aplicaciones son:

- Identificación humana
- Detección automática de objetos
- Automatización de la seguridad y video vigilancia
- Comunicación y compresión de video
- Realidad aumentada
- Control de tráfico.

En la Figura 19 muestra la detección de objetos en movimiento, es este caso los objetos son automóviles.

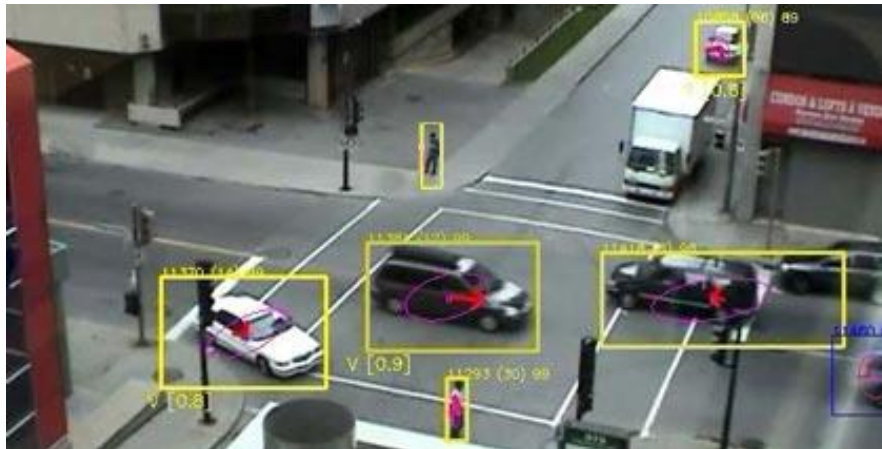


Figura 19 Seguimiento de objetos o tracking.

Fuente: (Legua, 2013)

A partir de una imagen donde ha sido reconocido el objeto, es necesario realizar la reducción de la imagen original a una nueva que contenga únicamente el objeto de interés, lo que permite reducir los datos que el programa debe procesar, realizando un seguimiento del objeto en tiempo real y con mayor simplicidad de cálculo (Pérez González, 2016).

2.3 Visión estereoscópica

La visión estereoscópica o estereoscopía, es un proceso que se realiza de manera natural cuando un observador mira simultáneamente dos imágenes de un mismo objeto que han sido captadas desde dos posiciones distintas. Cada ojo ve una imagen perspectiva del mismo objeto y el resultado es la percepción de la profundidad o tercera dimensión (Cárdenas, Morales, & Ussa, 2015).

Para obtener la forma de los objetos se realiza un análisis utilizando la distancia real de los objetos y la perspectiva de cada imagen con relación con un sistema de referencia, con la finalidad de obtener la tercera dimensión (Guerrero, Pajares, & Guijarro, 2015).

2.3.1 Métodos para la obtención de la estructura de una escena

Existen dos métodos para la obtención de la estructura de una escena y se describen a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6

Métodos para la obtención de la estructura de una escena

Métodos para la obtención de la estructura de una escena		
Métodos	Descripción	Ejemplo
Pasivos	No intervienen sobre la escena	<ul style="list-style-type: none"> • Visión Estereoscópica
Activos	Intervienen externamente sobre la escena, bien iluminándola o enviando un haz energético.	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores Ultrasonidos • Luz estructurada • Triangulación • Telemetro del tiempo de vuelo

Fuente: (Guerrero, Pajares, & Guijarro, 2015)

2.3.2 Proceso de la visión estereoscópica

Según el artículo titulado “Estimación de la disparidad en visión estereoscópica. Tratamiento de color” (Compañ, 2004), la visión estereoscópica es el conjunto de técnicas que intentan recuperar información tridimensional a partir de dos o más vistas de una escena, en el que se distinguen varias fases mostradas en la Tabla 7.

Como se puede observar se detalla el proceso para un sistema de visión estereoscópica móvil cuyos ejes de referencia cambian de posición haciendo que el sistema de visión artificial modifique sus parámetros que serán utilizados al procesar las imágenes.

Tabla 7

Fases del proceso de Visión Estereoscópica

Fases del Proceso de Visión Estereoscópica	
Fases	Descripción
Calibración de parámetros	Calibración de parámetros intrínsecos y extrínsecos involucrados en la geometría estereoscópica
Rectificación de la geometría	Rectificar la geometría epipolar para simplificar la búsqueda que se realiza para resolver el problema de correspondencia.
Correspondencia	Correspondencia entre tokens de las imágenes para obtener un mapa de disparidad.
Reconstrucción de la escena 3D	Consiste en calcular la profundidad a partir de la disparidad.

Fuente: (Compañ, 2004)

2.3.2.1 Procedimiento para la obtención de imágenes

En el desarrollo del proyecto se utilizará el método pasivo para la obtención de la estructura de una escena, para el cual se pueden utilizar los procedimientos mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8*Procedimiento para la obtención de imágenes*

Procedimiento para la obtención de imágenes	
Procedimiento	Descripción
Dos cámaras	Alineando dos cámaras de forma que se sitúen ligeramente desplazados en el espacio.
Una cámara	Desplazando una sola cámara con cierta distancia y captando las imágenes en diferentes desplazamientos.

Fuente: (Montalvo, 2010)

2.3.3 Técnicas de Visión Artificial Estéreo

2.3.3.1 Generación del Mapa de disparidad

Una forma de estimar la profundidad de cada uno de los puntos en la escena es mediante el cálculo de la disparidad entre las imágenes de la misma.

Dada la posición de los ojos en los humanos y la forma de moverlos las imágenes que se reciben en cada ojo son prácticamente iguales, con una diferencia en la posición relativa de los objetos. Estas diferencias relativas en la posición en cada imagen (la disparidad), tiene una relación directa con la distancia (profundidad) a la que se encuentran los objetos entre sí, y al observador. El cerebro es capaz de interpretar esa diferencia y reconstruir la estructura de la escena que ve el observador (Lecumberry, 2014).

En la Figura 21 se observa un diagrama de bloques con las etapas del proceso para la generación del mapa de disparidad.

En el artículo de título “Air-SSLAM:A Visual Stereo Indoor SLAM for Aerial Quadrotor” elaborado por Araújo, Miranda, Carmo, Alves y Oliveire. Se desarrolla un método

novedoso para la localización y mapeo visual simultaneo (SLAM), también llamado Air-SSLAM, que explota una configuración de cámara estereofónica (Aráujo, Miranda, Carmo, Alves, & Oliveira, 2017).

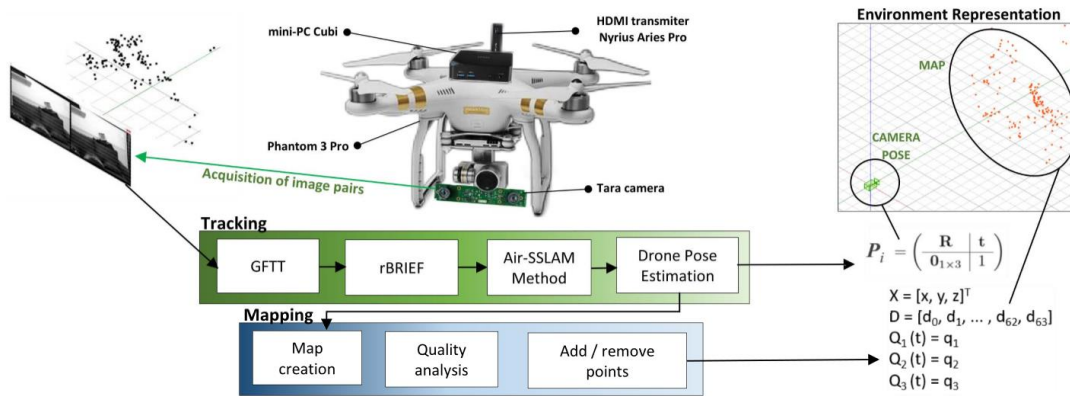


Figura 20 Sistema de generación del mapa de disparidad

Fuente: (García Y. , 2017)

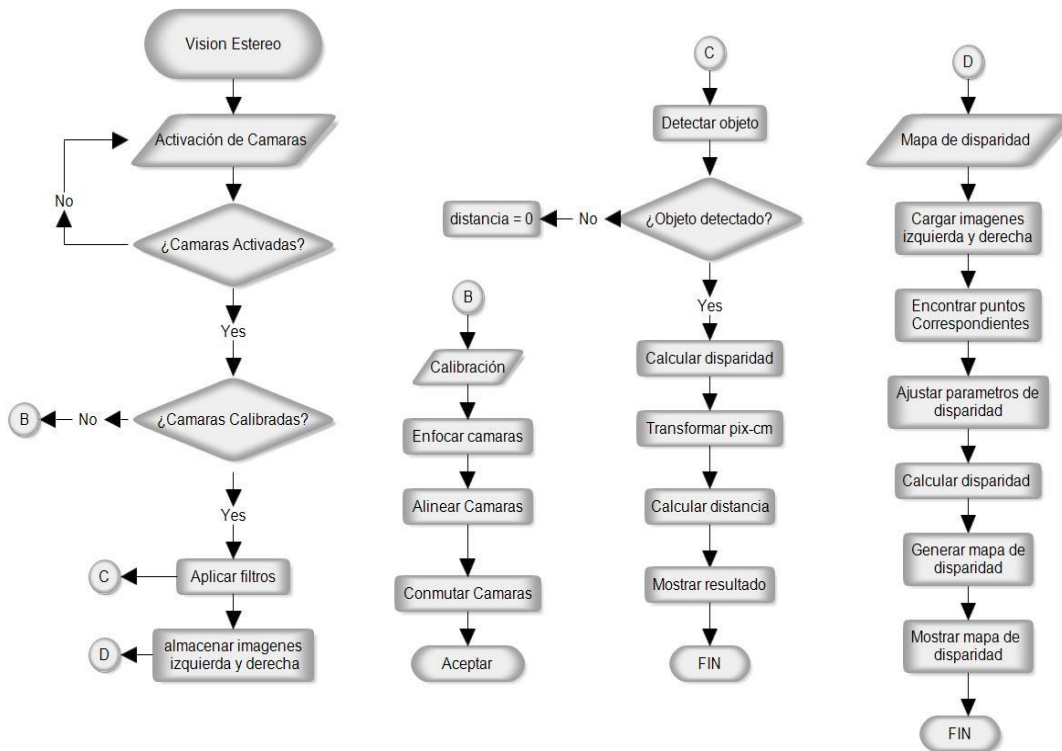


Figura 21 Etapas del proceso para la generación del mapa de disparidad

Fuente: (Lecumberry, 2014)

En la Tabla 9 se muestra los métodos de reconocimiento de expresiones.

Tabla 9

Métodos para la generación del mapa de disparidad

Método	Características
Algoritmo de Bobick e Intille -DP- (Domínguez Pavón, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> -Los mapas de disparidad que se obtienen con este algoritmo son aproximados a la solución real. -El método se calcula usando Programación Dinámica. -Modela las oclusiones y las integra en el proceso de cálculo de un costo mínimo (Bobick, 1999).
Algoritmo de Kolmogorov y Zabih-GC-	<ul style="list-style-type: none"> -Se basa en las técnicas de Corte de Grafos para hallar la correspondencia entre los puntos de las imágenes. -Con este algoritmo se obtienen tiempos mucho menores que con otros métodos de corte de grafos (Pinto, 2015).

2.4 Resumen

La robótica social estudia la interacción entre robots y seres humanos, así como la comunicación entre ellos, tomando en cuenta comportamientos, patrones y normas que rigen en la comunicación de la sociedad en la cual se desenvuelven. Los robots sociales fueron creados con la finalidad de ser insertados en el entorno social y realizar actividades como cuidado de enfermos, tareas domésticas, servicio al cliente, entretenimiento y aplicaciones en general donde exista la necesidad de interacción con el ser humano.

Los sistemas de visión artificial las principales características que se requiere son las formas, tamaños, localización de objetos, color, iluminación, textura y composición. El desarrollo de la visión artificial ha permitido que su campo de aplicación sea amplio en áreas como detección de rostros, reconocimiento de expresiones faciales y detección y seguimiento de objetos.

El reconocimiento de expresiones faciales, generalmente se utiliza un modelo en el cual se analiza el desplazamiento de los rasgos causados por dicha expresión.

La técnica de reconocimiento de objetos permite encontrar o identificar objetos en una imagen o secuencia de video. Por otro lado, el seguimiento de objetos tiene como finalidad la estimación de la trayectoria que realiza un objeto en una imagen de acuerdo con su movimiento en una escena. Para un adecuado desempeño del sistema de detección y seguimiento es importante aplicar técnicas y filtros que permitan reducir los datos que el programa debe procesar, realizando un seguimiento del objeto en tiempo real y con mayor simplicidad de cálculo.

La visión estereoscópica o estereoscopía, es un proceso que se realiza de manera natural cuando un observador mira simultáneamente dos imágenes de un mismo objeto que han sido captadas desde dos posiciones distintas. Cada ojo ve una imagen perspectiva del mismo objeto y el resultado es la percepción de la profundidad o tercera dimensión. La visión estereoscópica es el conjunto de técnicas que intentan recuperar información tridimensional a partir de dos o más vistas de una escena, en el que se distinguen fases como: calibración de parámetros, rectificación de la geometría, determinación de correspondencia y reconstrucción de la escena 3D. Es importante considerar las restricciones epipolar, de suavidad y de orden al momento de realizar el análisis para obtener la tercera dimensión, con la finalidad de evitar cálculos innecesarios y datos erróneos.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA PLATAFORMA ROBÓTICA

En el presente capítulo se describe el diseño y modelo del robot, además de mostrar la Interfaz Humano Maquina (HMI) implementada para interactuar con el robot y visualizar las aplicaciones de visión artificial.

3. 1 Metodología y diseño

3.1.1 Definición de necesidades

Las necesidades son requerimientos establecidos por el usuario, necesidades que permiten identificar los requerimientos funcionales que debe poseer el producto. Permitiendo realizar un diseño que genere satisfacción en el cliente.

En la Tabla 10 se muestran las necesidades del usuario, puntos de partida que permiten identificar posibles mejoras en el diseño de la plataforma robótica, con el objetivo de encontrar varias alternativas realizables y elegir la opción que cumpla los requerimientos.

Tabla 10

Requerimientos o necesidades del usuario.

NO.	REQUERIMIENTOS
1	El prototipo debe ser agradable
2	Resistente al uso continuo

CONTINÚA →

3	Fácil mantenimiento
4	Movilidad
5	Software de uso libre
6	Fácil interacción con el usuario
7	Percibir profundidad
8	Reconocer personas
9	Identificación y seguimiento de objeto
10	Identificar y proyectar expresiones faciales

3.1.2 Definición de características técnicas

Las características técnicas son factores que afectan de forma directa a las variables de los subsistemas del proyecto y se establecen una vez obtenidas las necesidades del cliente. En la Tabla 11 se muestra los requerimientos técnicos obtenidos según las necesidades del cliente.

Tabla 11

Características técnicas.

No.	REQUERIMIENTOS
1	Diseño y acabados superficial de la plataforma
2	Tipo de materiales
3	Estructura modular
4	Mecanismo de 3GDL
5	Software de programación de código abierto
6	HMI elaborada de acuerdo con normas
7	Visión artificial estéreo
8	Técnica de reconocimiento facial
9	Técnica de reconocimiento y seguimiento de objetos
10	Técnica de reconocimiento de expresiones

3.1.3 Matriz Quality Function Deployment (QFD)

La matriz QFD permite establecer la relación que existe entre las necesidades del cliente con las características técnicas y se valora subjetivamente el grado de dificultad que implica alcanzarlas (Ficalora & Cohen, 2009).

En la Figura 22 se muestra la matriz QFD, se estableció la correlación de las necesidades del cliente y las características técnicas, así como el grado de importancia de cada requerimiento.

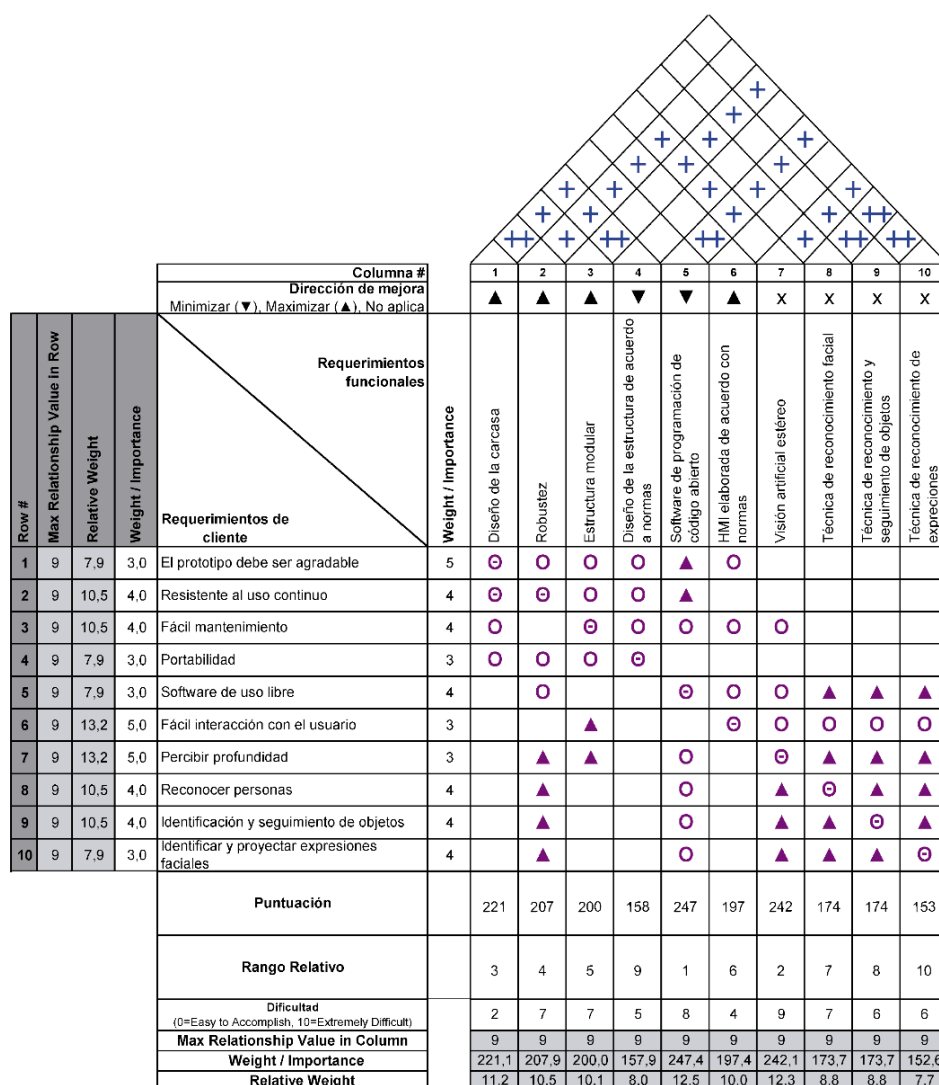


Figura 22 Matriz QFD.

La Tabla 12 detalla la simbología japonesa utilizada en el análisis de correlación en la matriz QFD.

Tabla 12

Simbología.

Simbología	Descripción
⊙	Muy relacionado (9)
○	Correlacionado (3)
▲	Poco relacionado (1)
††	Fuerte Correlación Positiva
†	Correlación Positiva
—	Correlación Negativa
▼	Fuerte Correlación Negativa
▽	El Objetivo es Minimizar
▲	El objetivo es Maximizar
x	Objetivo alcanzado

En la Tabla 13 se muestra las características técnicas según los resultados obtenidos, correspondientes al orden de importancia de cada uno de los requerimientos.

Tabla 13

Resultados de la matriz QFD.

Orden	Características Técnicas	Puntuación
1	Software de programación de código abierto	247
2	Visión artificial estéreo	242
3	Tipos de materiales	208
4	Mecanismo de 3GDL	187
5	HMI elaborada de acuerdo con normas	174
6	Técnica de reconocimiento facial	174

CONTINÚA →

7	Técnica de reconocimiento y seguimiento de objetos	174
8	Estructura modular	158
9	Técnica de reconocimiento de expresiones	153
10	Diseño y acabado superficial de la plataforma	137

3.2 Factibilidad y planeación

3.2.1 Estructura funcional

Una vez obtenidos los resultados de la matriz QFD, se procede a agrupar las características afines a cada uno de los subsistemas, las cuales en conjunto conforman la estructura funcional donde se encuentran las características que debe tener el producto final.

Definir subsistemas permite trabajar con sistemas menos complejos, de manera que, si cada uno de ellos trabaja correctamente, el sistema completo también lo hará, cumpliendo las necesidades establecidas inicialmente por el consumidor. En la Tabla 14 se muestra los subsistemas y funciones obtenidos definidos por la plataforma robótica de visión artificial,

Tabla 14

Subsistemas y funciones,

Nº	Módulo	Subsistema	Funciones	Requerimientos
1	Mecánico	Mecanismo 3 GDL Actuador Material de estructura Material de los ejes de la estructura	Mecanismo de 3 GDL para la orientación de la plataforma	3,4,8,10

CONTINÚA →

2	Electrónico	Medio de comunicación de datos Fuente de alimentación Dispositivo para representación de expresiones	Sistema encargado de alimentación y adquisición de datos	8
3	Control	Procesador Software de control	Procesamiento de datos y emisión de las señales de control	1,2
4	Visión artificial	Sensor cámara Software de procesamiento de imágenes Sistema de visión artificial estéreo	Técnicas de visión artificial mono y estéreo	2,6,7,9
5	Diseño de la carcasa	Material de la carcasa	Realizado para la protección del sistema mecatrónico	3,10
6	Diseño de la interfaz	Software de interfaz humano maquina	Medio de interacción entre el usuario y la plataforma robótica	1,5

El proceso de diseño de un producto según (Rod, 2014), presenta como: diseño preliminar y diseño final.

3.3 Módulo 1: Subsistema Mecánico

3.3.1 Mecanismo 3GDL

Desde el punto de vista mecánico el robot es una cadena cinemática, secuencia de eslabones y articulaciones, de forma que los eslabones tienen movimientos relativos entre si materializados a través de las articulaciones que los unen. Los grados de libertad de una articulación se corresponden con el número de movimientos que permita.

Se seleccionó el mecanismo tipo rótula, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 1.

3.3.2 Actuador

Los actuadores son elementos encargados de generar la energía traslacional que permite la movilidad de las cadenas cinemáticas del robot.

En la Figura 23 se muestra el diagrama de los elementos que forman parte del mecanismo.

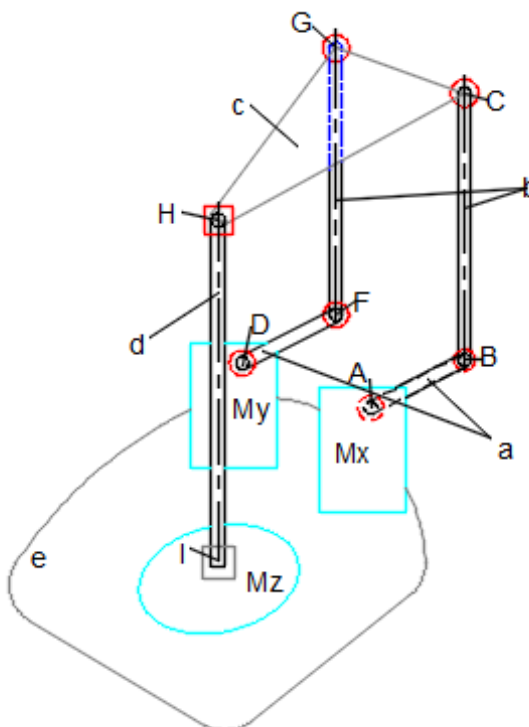


Figura 23 Mecanismo de 3GDL esquema general, diseño preliminar

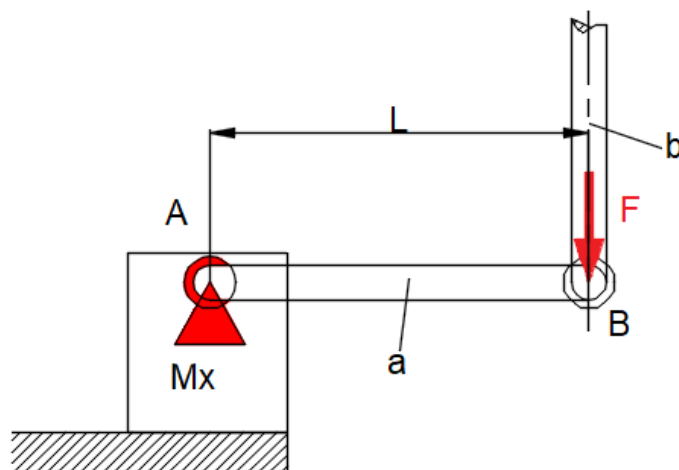
En la Tabla 15 se detallan los nombres de los elementos mostrados en la Figura 23.

Tabla 15*Elementos del mecanismo de 3GDL,*

Letra	Nombre
a	Acople1,2
b	Eje columna 1, 2
c	Soporte
d	Eje columna principal
e	Base móvil
Mx, My, Mz	Motores
A, B, C, D, F, G, H, I	Articulaciones

3.3.2.1 Dimensionamiento del actuador**3.3.2.1.1 Torque motor para el giro en X y Y**

En la Figura 24 se muestra un esquema del motor Mx, donde se puede ver la fuerza aplicada sobre el brazo u acople del motor.

**Figura 24** Torque motor brazos X y Y.

Dada la ecuación 3.1 se calcula el torque motor X y Y.

$$T = F * L \quad (3.1)$$

Donde:

- T : es el torque del motor
- F : es la fuerza aplicada
- L : es la distancia

Los valores de $L=40\text{mm}$ y $F=0,25\text{kg}$ obtenidos del modelado CAD. Anexo 8 se calcula el torque necesario para el movimiento cuyo resultado se muestra a continuación:

$$T = 0.99932 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Para calcular el torque nominal requerido para la implementación se utiliza la ecuación 3.2.

$$T_{fm} = n \cdot \left(\frac{100}{e}\right) \cdot T \quad (3.2)$$

Donde:

- T_{fm} : es el torque nominal
- e : es la eficiencia del motor.
- n : es el factor de seguridad.

Para el cálculo se utiliza $n = 2$ y un $e = 90$ criterios de diseño para el funcionamiento adecuado.

A partir de la ecuación 3.2 se calcula el torque del motor X y Y nominal de las cadenas mostrado a continuación:

$$T_{f^{m_{cadenas}}} = 2.22 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Se seleccionó el servomotor TowerPro MG995, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 1.

3.3.2.1.2 Torque del motor de la base móvil

Para el dimensionamiento del motor de la base se debe establecer las cargas en estado de reposo que afectan el comportamiento del motor. El análisis se realizó considerando las fuerzas mostradas en la Figura 25. En la Tabla 16 se muestran los datos para dimensionar el servomotor.

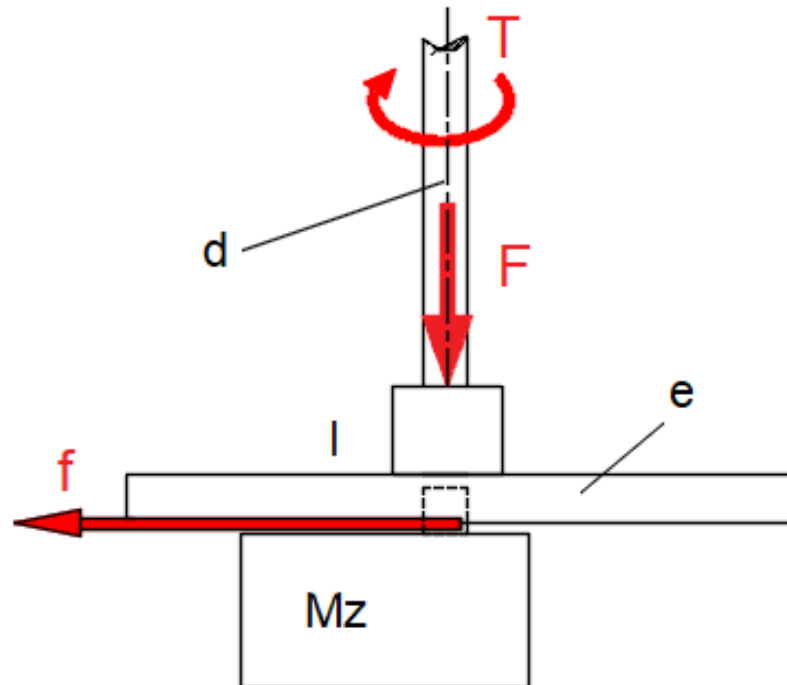


Figura 25 Torque motor base móvil.

Tabla 16*Datos para dimensionamiento de motores.*

Dato	Valor
Masa del mecanismo (m)	2 kg
Radio de la base (R)	120 mm
Gravedad (g)	9.81 m/s ²
Aceleración Base Móvil (a)	8.86 m/s ²
Factor de seguridad (fs)	2
Eficiencia (e)	90

Para que el robot inicie su movimiento se necesita vencer la fuerza de fricción. Dicha relación se determina en la ecuación 3.3. Así como también considerar la sumatoria de momentos generados en el sistema mostrado en la ecuación 3.4.

$$f = \mu \cdot N \quad (3.3)$$

$$T = f \cdot R \quad (3.4)$$

Donde:

- f : es la fuerza de rozamiento
- μ : es el coeficiente de fricción
- N : es la fuerza normal o reacción que se produce al estar en contacto con las dos superficies, la de la base fija y la base móvil.
- T : es el torque del motor
- R : es el radio de la base.

Para dimensionar los motores, se debe considerar los límites de funcionamiento del mismo es decir se considera el movimiento introduciendo la aceleración. A partir de la sumatoria de fuerzas como se muestra en la ecuación 3.5.

$$\sum F_x = m \cdot a = P + f \quad (3.5)$$

La ecuación 3.6 representa el torque nominal necesario para que la base gire por el plano con velocidad variable utilizando un solo motor.

$$T_{fm_{base}} = f_s \left(\frac{100}{e} \right) \cdot (m \cdot R \cdot [g - a]) \quad (3.6)$$

Donde:

- f_s : factor de seguridad.
- e : eficiencia.
- m : masa del robot.
- g : aceleración de la gravedad
- a : aceleración.

El resultado del torque nominal al reemplazar los valores de la Tabla 16 en la ecuación 3.6 es de:

$$T_{fm_{base}} = 5.098 \text{ kg cm}$$

En la Tabla 17 se muestran los datos del servomotor seleccionado a partir de los valores calculados.

Tabla 17*Datos servomotor MG996*

SERVOMOTOR MG 996	
Par de torsión	9.4 kgf*cm (4.8 V), 11 kgf*cm (6V)
Velocidad de operación	4.7 V a 7.2 V
Dimensiones	Largo 40.7 mm ancho 19.7 mm altura 42.9
Voltaje	0.17 s/60°, 0.14 s/60°

3.3.3 Material de los ejes de la estructura

Se seleccionó el acero, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 1.

3.3.3.1 Dimensionamiento pasadores

La selección del material se hizo basados en el Catálogo Aceros Ingeniería al carbono, muestra que el ACERO ASTM A36 es utilizado principalmente para partes de maquinaria que no estén sometidos a grandes esfuerzos mecánicos como: ejes, eslabones para cadenas, pasadores, bujes cementados, tornillería corriente, bridas, piñones para transmisión de cadena a bajo esfuerzo, clavos para ferrocarril, grapas, etc. (Compañía General de Aceros S.A). En la Tabla 18 se muestra las propiedades del material ASTM A36.

Tabla 18*Propiedad material ASTM A36*

Fuente: (Budynas & Keith, 2008)

MATERIAL	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)
ASTM A36	$S_{ut} = 350$	$S_y = 350$

3.3.3.1.1 Pasador cruceta Y

En la Figura 26 el pasador cruceta Y simulado mediante un software de análisis de elementos estructurales, ver el pasador en la sección del Anexo 8.

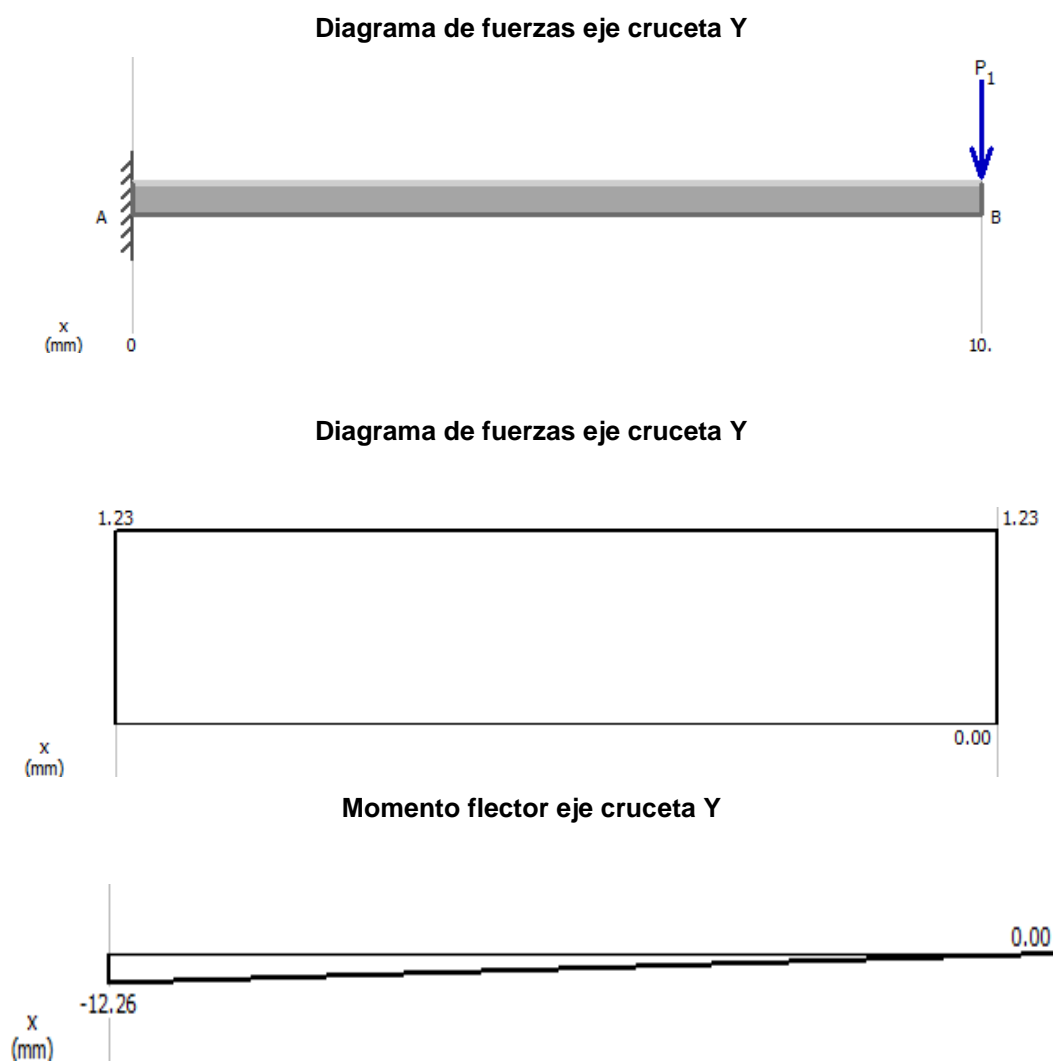


Figura 26 Eje cruceta Y

En la Tabla 19 se muestra el momento flexionante y de torsión del eje cruceta Y.

Tabla 19*Momento flexionante y Torsión*

VARIABLE	VALOR
Momento flexionante (M_a)	12.26 N · mm
Torsión (T_m)	1.845 N · mm

3.3.3.1.1 Concentración del esfuerzo y sensibilidad

Se realiza este análisis de concentración para puntualizar la existencia de irregularidades como orificios, ranuras o muescas que incrementan de manera significativa el esfuerzo.

Se calcula K_f el factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión, se considera el valor de K_t (o K_{ts}) que es un factor de concentración del esfuerzo, debido a la disminución de la sensibilidad a la muesca. El cálculo de K_f se realiza mediante la ecuación 3.7.

$$K_f = 1 + q \cdot (K_t + 1) \quad (3.7)$$

Donde:

- K_t : es el factor de concentración del esfuerzo.
- q : es la sensibilidad de la muesca.
- q_s : es la sensibilidad de la muesca cortante.
- K_{ts} : es el factor de concentración del esfuerzo cortante.

3.3.3.1.1.2 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Se procede a calcular el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de maquina en la geometría y condición de uso, que está dada por la ecuación 3.8 (Budynas & Keith, 2008).

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e' \quad (3.8)$$

Donde:

- k_a : factor de modificación de la condición superficie.
- k_b : factor de modificación de la superficie.
- k_c : factor de modificación de la carga.
- k_d : factor de modificación de la temperatura.
- k_e : factor de confiabilidad.
- k_f : factor de modificación de efectos varios
- S_e' : límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
- S_e : límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Se procede a calcular los factores anteriormente mencionados. Para calcular k_a se usa la ecuación 3.9.

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (3.9)$$

Donde:

- a, b : son constantes del factor de condición superficial de Marin.
- S_{ut} : es la resistencia a la tensión (ver Tabla 19).

En (Budynas & Keith, 2008) se obtuvo las constantes del factor de condición superficial de Marín, donde $a = 4.51 \text{ MPa}$ y un $b = -0.265$. Obteniendo un valor de k_a de 0.847.

Para obtener S_e' se calcula mediante 3.10.

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut} = 275 \text{ MPa} \quad (3.10)$$

Para los factores k_c , k_d , k_e , y k_f se obtiene de (Budynas & Keith, 2008), por tanto tienen el valor de $k_b = 0.9$ y $k_c = k_d = k_e = k_f = 1$. Con los factores anteriormente mencionados y calculados, se puede calcular el valor de S_e de la ecuación 3.8.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e' = 209.63 \text{ MPa}$$

3.3.3.1.1.3 Estimación del diámetro nominal

Para la estimación del diámetro se usa el criterio ED-Goodman de la ecuación 3.11, este criterio es recomendable para diseño de ejes, puesto que es simple y conservador. Se reemplaza los valores en la ecuación, con factores de seguridad mínima de 1.5 (Budynas & Keith, 2008).

$$d = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{S_e} \cdot \left[4 \cdot (K_f \cdot M_a)^2 + 3 \cdot (K_{fs} \cdot T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4 \cdot (K_f \cdot M_m)^2 + 3 \cdot (K_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{1/2} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.11)$$

Donde el K_{fs} es el factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión.

En la Tabla 20, se muestran los valores de los factores de concentración del esfuerzo.

Tabla 20

Estimaciones de los factores de concentración del esfuerzo.

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro agudo [r/d=0.02]	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado [r/d=0.1]	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado [r/d=0.02]	2.2	3.0	-
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	-	-
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Para K_f se escoge un valor de 1.7 y para K_{fs} un valor de 1.5, estos valores se seleccionaron de la Tabla 20.

Los valores M_a y T_m (ver Tabla 19), K_f y K_{fs} se reemplazan en la ecuación 3.12 para obtener el valor del diámetro que se muestra a continuación:

$$d = 1.17 \text{ mm}$$

3.3.3.1.4 Verificación de la estimación

Se selecciona un valor mayor diámetro que es $d = 1.77 \text{ mm}$ por el valor de $d = 3 \text{ mm}$. Una relación típica de D/d de 1.2 para el soporte en un hombro se calcula el radio del filete mediante la ecuación 3.13.

$$r = 0.1 * d = 0.3 \text{ mm} \tag{3.12}$$

Se calcula K_f el factor de concentración del esfuerzo reducido usando la ecuación 3.15. Del Anexo 1 se seleccionó los valores K_t de 1.6, q de 0.82, K_{ts} de 1.35 y q_s de 0.85.

Se reemplazan los valores en la ecuación 3.7 y se calcula el factor de concentración de esfuerzo K_{fs} y el factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión K_f mostrados a continuación:

$$K_f = 1.49$$

$$K_{fs} = 1.30$$

Se verifica los resultados obtenidos calculando S_e . Para ello se calcula el factor k_b mediante la ecuación 3.13.

$$k_b = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.107} = 1.104 \quad (3.13)$$

Obteniendo un valor de S_e de 257.357 MPa.

3.3.3.1.1.5 Esfuerzo en el pasador

Se calcula los esfuerzos de Von Mises para ejes giratorios, redondos y sólidos, sin tomar en cuenta las cargas axiales, están dados por las ecuaciones 3.14 y 3.15.

$$\sigma_a' = K_f \cdot \frac{32 \cdot M_a}{\pi \cdot d^3} = 68.9 \text{ MPa} \quad (3.14)$$

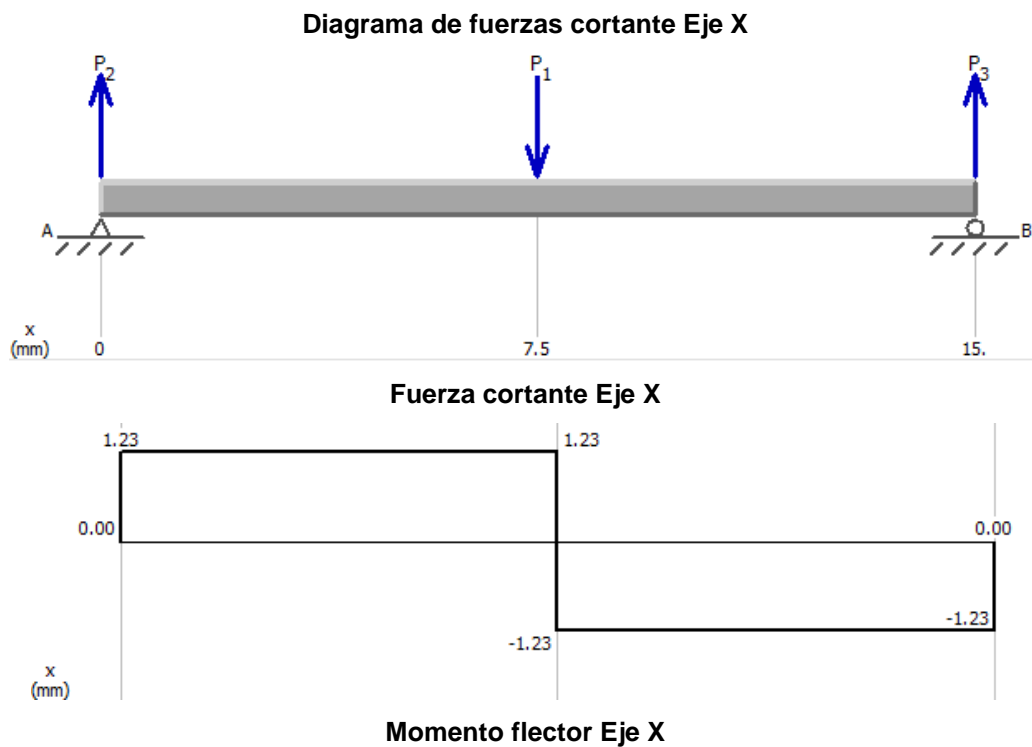
$$\sigma_m' = \left[3 \cdot \left(K_{fs} \cdot \frac{16 \cdot T_m}{\pi \cdot d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.784 \text{ MPa} \quad (3.15)$$

Usando el criterio de Goodman, utilizando la ecuación 3.16 se calcula el factor n_f dando un resultado de 3.704.

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a'}{S_e} + \frac{\sigma_m'}{S_{ut}} \quad (3.16)$$

3.3.3.1.2 Pasador cruceta X

En la Figura 27 es un diagrama de fuerzas, para simular los esfuerzos a los que está sometido el en el pasador cruceta X ver en la sección del Anexo 8.



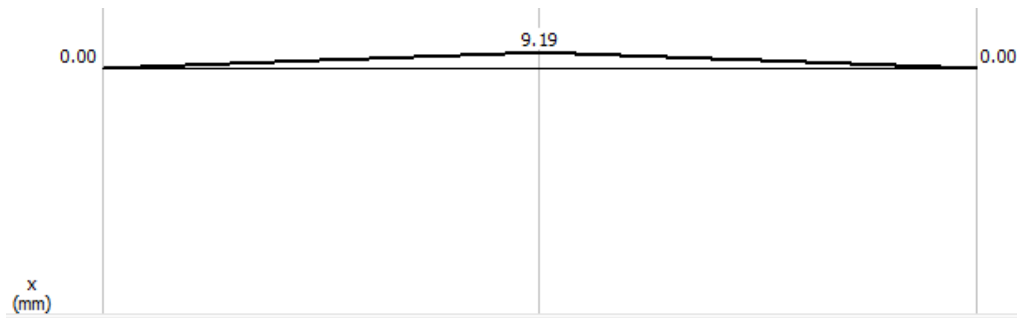


Figura 27 Eje cruzeta X

En la Tabla 21 se muestra el momento de flexionante y de torsión del eje cruzeta X.

Tabla 21

Momento flexionante y Torsión Eje cruzeta X

VARIABLE	VALOR
Momento flexionante (M_a)	9.19 N · mm
Torsión (T_m)	3.678 N · mm

Para calcular la estimación del diámetro nominal, se utiliza la ecuación 3.11. Los valores M_a y T_m (ver Tabla 21), se reemplazan y se obtiene el siguiente valor:

$$d = 1.104 \text{ mm}$$

Se calcula los esfuerzos de von Mises para ejes, el valor de M_a (ver Tabla 21) y $d = 3 \text{ mm}$ se reemplaza en las ecuaciones 3.14 y 3.15 obteniendo los siguientes valores:

$$\sigma_a' = 68.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m' = 1.56 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad utilizando el criterio de Goodman, reemplazando los valores de σ_a' y σ_m' en la ecuación 3.16.

$$n_f = 4.87$$

3.3.3.1.2 Rótula

En la Figura 28 es un diagrama de fuerzas, para simular los esfuerzos a los que está sometido el en la rótula ver en la sección del Anexo 8.

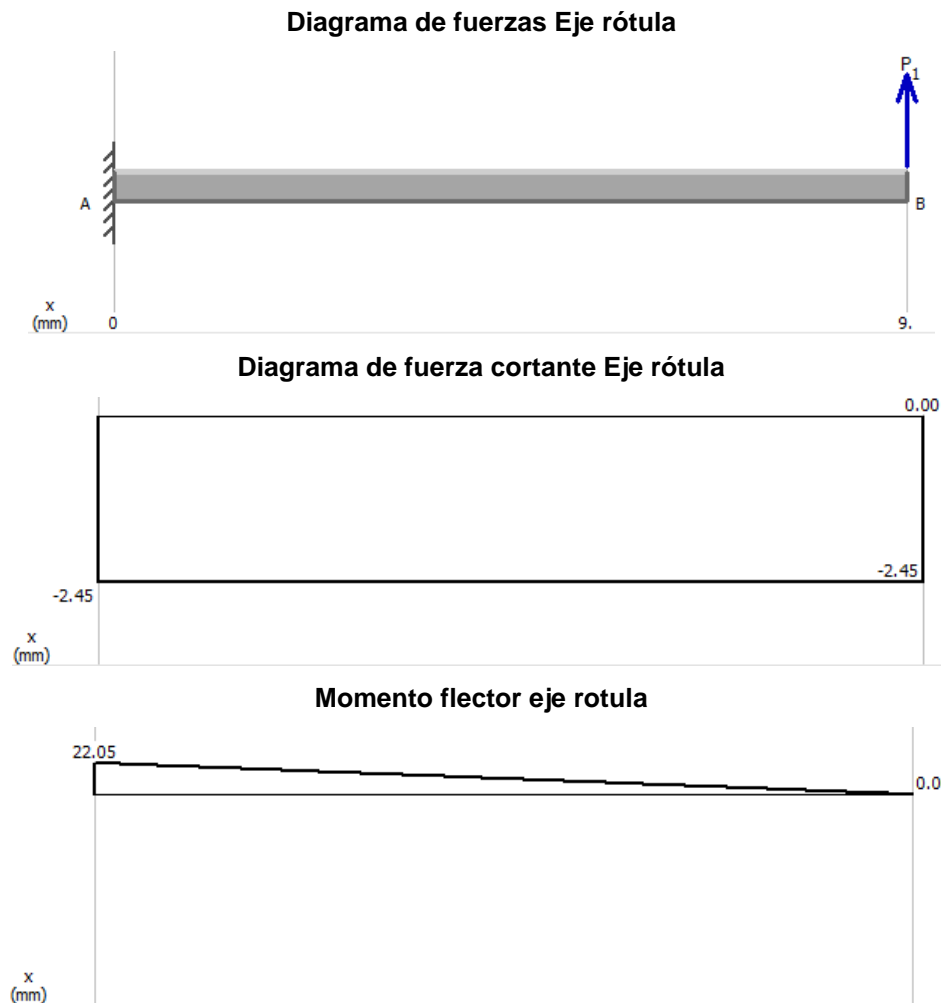


Figura 28 Momento flector eje rotula

En la Tabla 22 se muestra el momento de flexionante y de torsión de la rótula.

Tabla 22

Momento flexionante y Torsión Rótula.

VARIABLE	VALOR
Momento flexionante (M_a)	22.05 N · mm
Torsión (T_m)	6.125 N · mm

Para calcular la estimación del diámetro nominal, se utiliza la ecuación 3.11. Los valores M_a y T_m (ver Tabla 22), se reemplazan y se obtiene el siguiente valor:

$$d = 1.45 \text{ mm}$$

Se calcula la los esfuerzos de von Mises para ejes, el valor de M_a y T_m (ver Tabla 22) y $d = 3 \text{ mm}$ se reemplaza en las ecuaciones 3.14 y 3.15 obteniendo los siguientes valores:

$$\sigma_a' = 123.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m' = 2.60 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de seguridad utilizando el criterio de Goodman, reemplazando los valores de σ_a' y σ_m' en la ecuación 3.16.

$$n_f = 2.045$$

3.3.3.2 Dimensionamiento de ejes columna 1 y 2

En la Figura 29 se muestra la viga principal que sostiene la cabeza del robot.

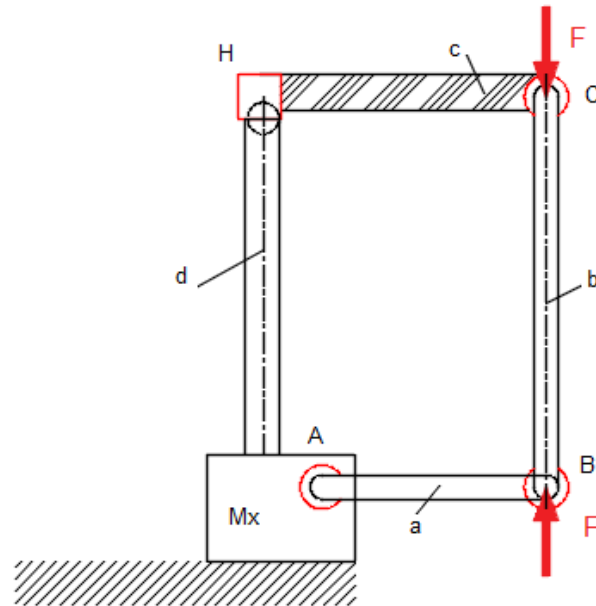


Figura 29 Columnas 1 y 2

Para saber si la columna es larga o corta, se debe calcular primero la esbeltez, considerando las características del material para compararla posteriormente con la esbeltez calculada, tomando en cuenta la geometría de la pieza o de la columna.

Se debe calcular la esbeltez según las propiedades del material, este dado por la ecuación 3.17.

$$\frac{L}{r} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{K \cdot \tau_{cr}}} = 2.48 \quad (3.17)$$

Donde:

- L : es la longitud de la columna
- r : es el radio de giro
- E : es módulo de elasticidad, está dado según la norma ASTM A36-05.
- K : es la constante según la forma del apoyo.
- τ_{cr} : es el límite elástico este dado según la norma ASTM A36-05.

Se debe calcular el área de la sección de la columna para posteriormente tener el radio de giro, esto se realiza mediante la ecuación 3.18.

$$A = \pi \cdot r^2 = 19.635 \text{ mm}^2 \quad (3.18)$$

Donde A : es el área de la sección de la columna.

En la Figura 30 se muestra el módulo de sección circular, en el Figura 31 diagrama de esfuerzo y radio de giro columna larga.

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	207.0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	2.5000	mm
From centroid to top	y (top)	2.5000	mm
Area of shape	A	19.6350	mm ²
Moment of Inertia	I _x	30.6796	mm ⁴
Section Modulus	S _x	12.2718	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	12.2718	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	12.2718	mm ³
Radius of Gyration	r _x	1.2500	mm
Plastic Modulus	Z _x	20.8333	mm ³
Shape Factor		1.6977	
From bottom to plastic n.a.	y _p (bot)	2.5000	mm
From plastic n.a. to top	y _p (top)	2.5000	mm
Polar Moment of Inertia	J	61.3592	mm ⁴
Product of Inertia	I _{xy}	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	30.6796	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	30.6796	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	β	0.0000	degrees
		Clockwise	

Figura 30 Propiedades de la sección circular.

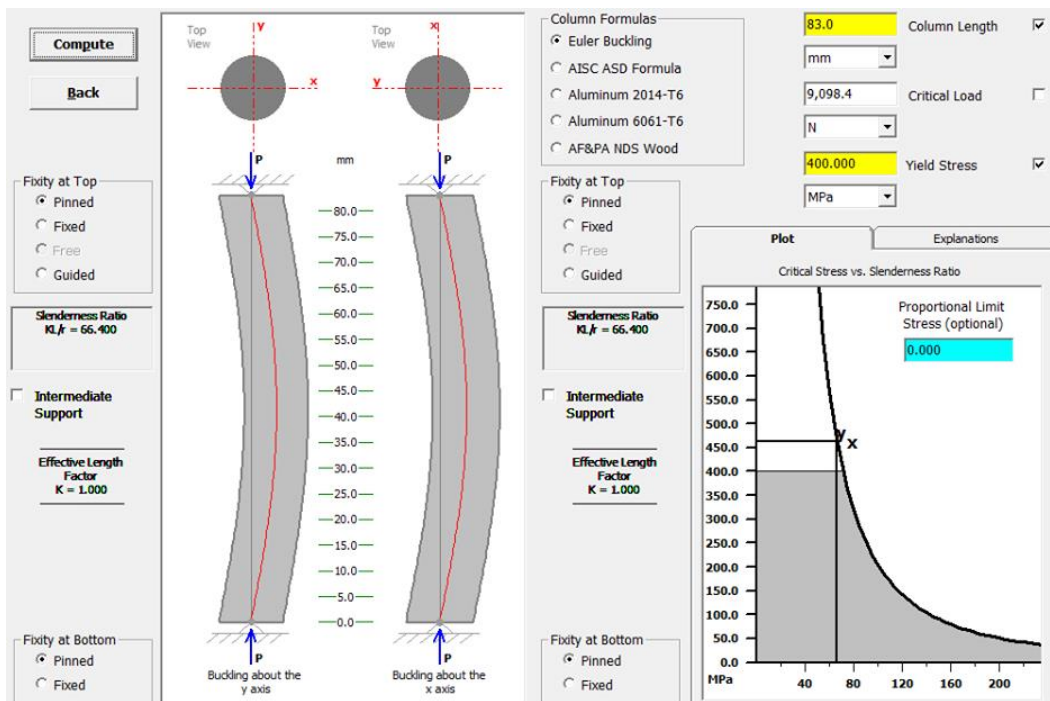


Figura 31 Diagrama Esfuerzo vs radio de giro columna larga

Se calcula la esbeltez considerando la geometría de la pieza, primero se calcula el radio de giro, usando la ecuación 3.53.

$$r_{giro} = \sqrt{\frac{I}{A}} = 1025 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Donde I : es el momento de inercia de 30.6796 mm^4 (Ver Figura 31)

Una vez calculada el radio de giro, se debe calcular la esbeltez usando la relación de la ecuación 3.17.

$$\frac{L}{r_{giro}} = 66.5$$

Para saber si la viga es larga o corta se aplica esta relación:

$$66.5 > 2.48 \text{ entonces es columna larga}$$

Se realiza el cálculo de esfuerzo critico (τ_{cr}) usando la ecuación 3.20.

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{K \cdot \left(\frac{L}{r_{giro}}\right)^2} = 0.56 \text{ MPa} \quad (3.20)$$

Posteriormente se calcula el esfuerzo de trabajo, usando la ecuación 3.21.

$$\tau_w = \frac{\tau_{cr}}{n} = 0.19 \text{ MPa} \quad (3.21)$$

Donde n es el factor de seguridad.

Se calcula la carga crítica utilizando la ecuación 3.22.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{K \cdot L^2} = 10.98 \text{ N} \quad (3.22)$$

Se calcula la carga de trabajo utilizando la ecuación 3.23.

$$P_{\omega} = \frac{P_{cr}}{n} = 3.66 \text{ N} \quad (3.23)$$

La carga de trabajo según el software de diseño es $P = 0.25 \cdot 9.81 = 2.45 \text{ N}$.

3.3.3.2.1 Columna principal

En la Figura 32 se muestra la viga principal que sostiene la cabeza del robot.

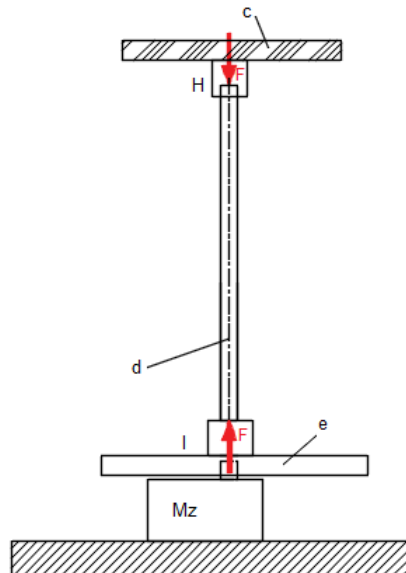


Figura 32 Columna principal

En la Figura 33 se muestra el módulo de sección circular, en el Figura 34 diagrama de esfuerzo y radio de giro columna larga.

X Axis Properties			
Elastic Modulus	E	207.0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	3.2000	mm
From centroid to top	y (top)	3.2000	mm
Area of shape	A	32.1699	mm ²
Moment of Inertia	Ix	82.3550	mm ⁴
Section Modulus	Sx	25.7359	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	25.7359	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	25.7359	mm ³
Radius of Gyration	rx	1.6000	mm
Plastic Modulus	Zx	43.6907	mm ³
Shape Factor		1.6977	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	3.2000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	3.2000	mm
Polar Moment of Inertia	J	164.7099	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	0.0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	I _{max}	82.3550	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	I _{min}	82.3550	mm ⁴
Angle from x axis to I _{max} axis	β	0.0000	degrees

Figura 33 Módulo de sección circular

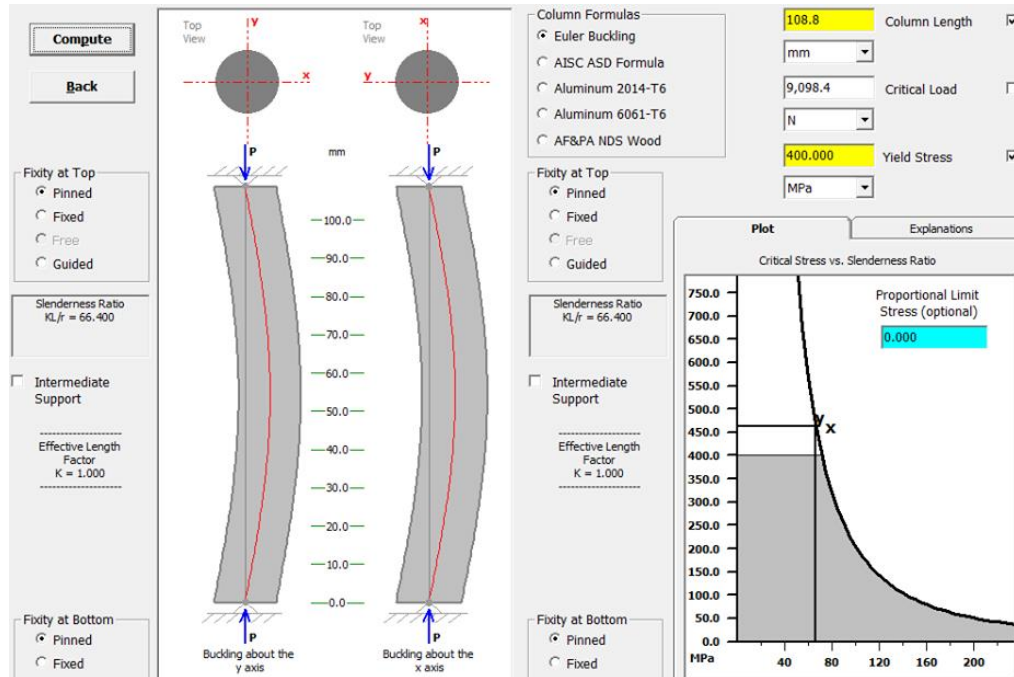


Figura 34 Diagrama Esfuerzo vs radio de giro columna larga

Se debe calcular la esbeltez usando la ecuación 3.17.

$$\frac{L}{r} = 2.48$$

Para obtener el área de la sección de la columna se reemplaza los valores correspondientes en la ecuación 3.18.

$$A = 32.17 \text{ mm}^2$$

Se calcula el radio de giro usando la ecuación 3.19 el valor I (82.355 mm^4) se obtiene de la Figura 33.

$$r_{\text{giro}} = 1.6 \text{ mm}$$

Para saber si la viga es larga o corta se aplica esta relación:

$$68 > 2.48 \text{ entonces es columna larga}$$

Se debe calcular la esbeltez usando la ecuación 3.17.

$$\frac{L}{r_{giro}} = \frac{108.8mm}{1.6mm} = 68$$

Se calcula el esfuerzo critico (τ_{cr}) usando la ecuación 3.20, y el esfuerzo de trabajo (τ_w) usando la ecuación 3.21 al reemplazar los valores correspondientes obteniendo los siguientes valores:

$$\tau_{cr} = 36.29 \text{ MPa}$$

$$\tau_w = 12.095 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo critico (P_{cr}) usando la ecuación 3.22, y el esfuerzo de trabajo (P_w) usando la ecuación 3.23 al reemplazar los valores correspondientes obteniendo los siguientes valores:

$$P_{cr} = 17.16 \text{ N}$$

$$P_w = 5.72 \text{ N}$$

La carga de trabajo según el software de diseño es $P = 0.25 * 9.81 = 2.45 \text{ N}$

3.3.4 Material de los elementos de la estructura

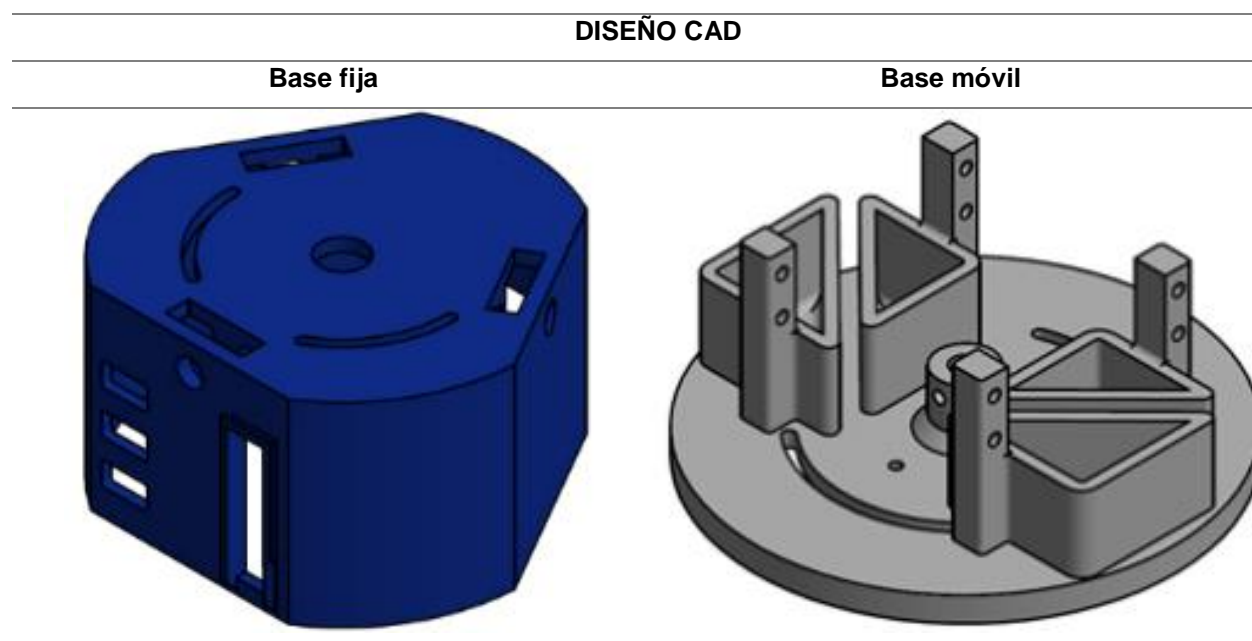
Se considera el material como factor importante para la fabricación de la estructura del mecanismo. Se selecciono el PLA (Ácido Poliláctico Poliácido Láctico), el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 1.

3.3.4.1 Análisis de elementos finitos en los componentes de la estructura impresos

Se realiza un análisis CAE de cada pieza, para comprobar las tensiones, desplazamientos y factores de seguridad de cada elemento que forma la estructura mecánica. En la Tabla 23 se muestra el diseño CAD de la estructura del robot.

Tabla 23

Diseño CAD estructura del robot

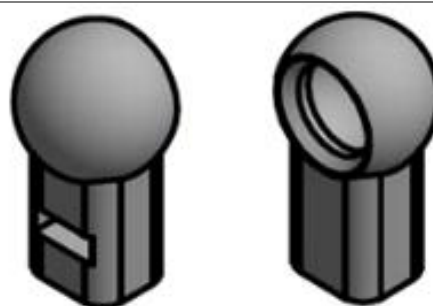


CONTINÚA →

Acoples motores



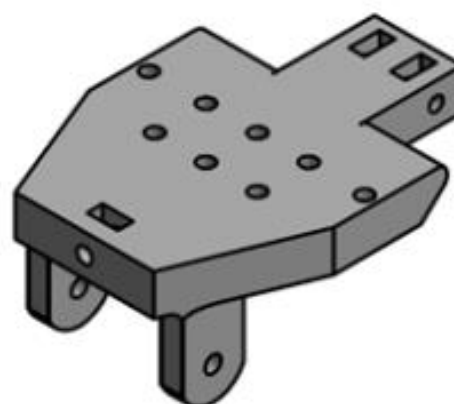
Rótula



Horquilla eje



Horquilla soporte



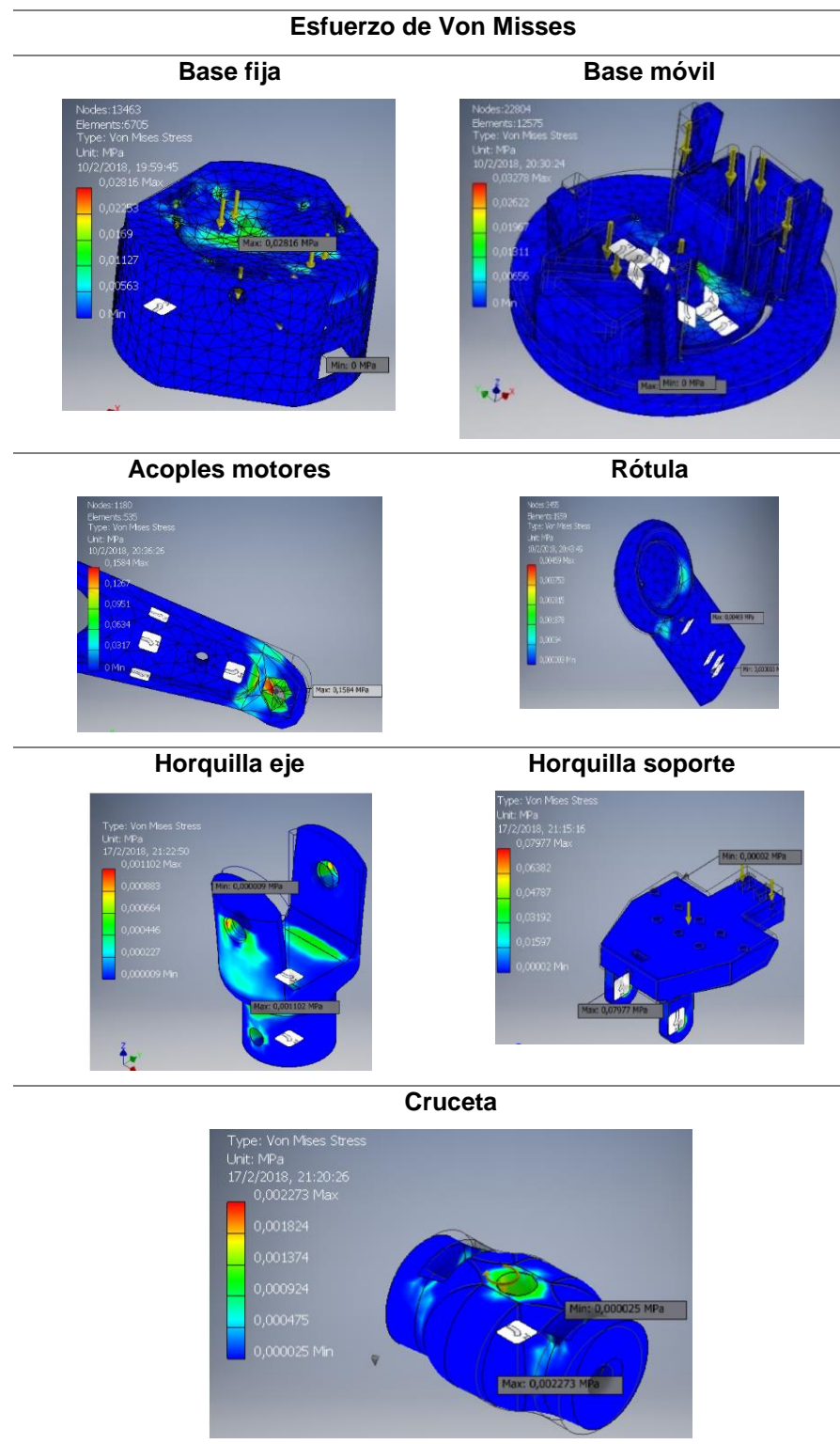
Cruceta



En la Tabla 24 se puede observar un resumen del análisis de Esfuerzos de Von Mises realizados a cada pieza de la estructura mecánica.

Tabla 24

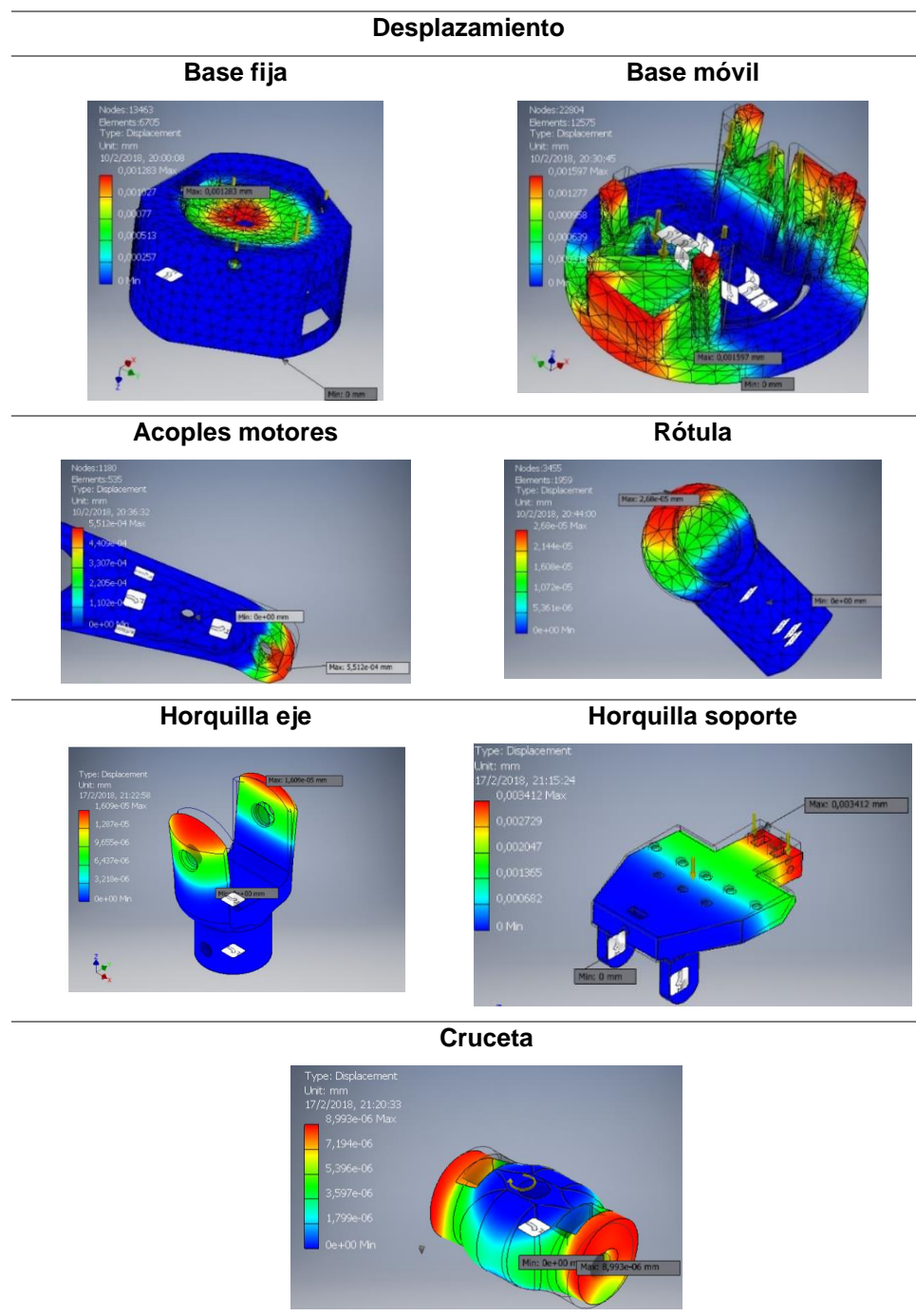
Esfuerzo de Von Mises estructura del robot



En la Tabla 25 se puede observar un resumen del análisis de Desplazamientos realizados a cada pieza de la estructura mecánica.

Tabla 25

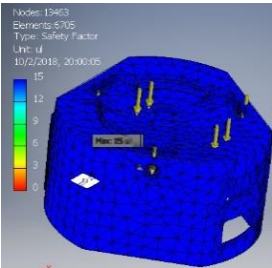
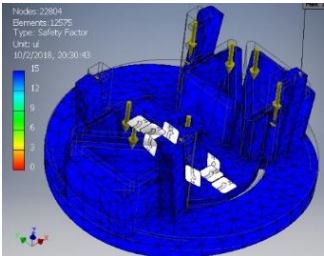
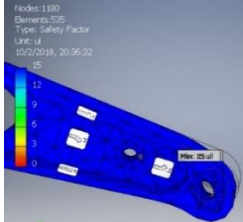
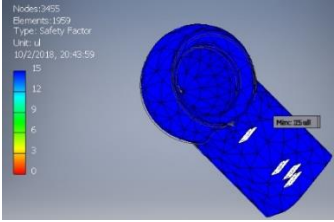
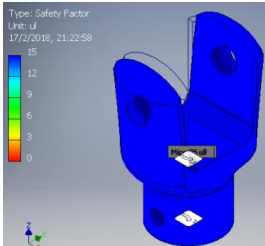
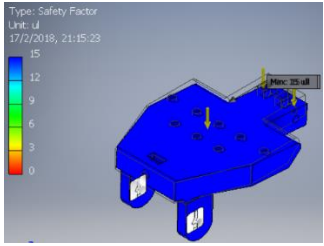
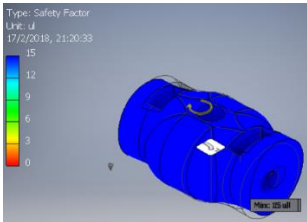
Desplazamiento estructura del robot



En la Tabla 26 se puede observar un resumen del análisis del factor de seguridad realizados a cada pieza de la estructura mecánica.

Tabla 26

Factor de seguridad estructura del robot

Factor de Seguridad	
Base fija	Base móvil
	
Acoples motores	Rótula
	
Horquilla eje	Horquilla soporte
	
Cruceta	
	

En la Tabla 27 se muestra el análisis de resultados CAE, también se puede observar el factor de seguridad que es 15 por lo que se puede asegurar que las piezas soportarán las cargas a las que serán sometidas garantizando resultados positivos para la fabricación de las piezas dando una resistencia adecuada para las cargas que serán sometidas.

Tabla 27

Resultados análisis CAE.

	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
Base Fija	0.02816	0.001283	15
Base Móvil	0.03278	0.001597	15
Acoples motores	0.1584	$5.512 \cdot 10^{-4}$	15
Rótula	0.00469	$2.68 \cdot 10^{-5}$	15
Horquilla eje	0.001102	$1.609 \cdot 10^{-5}$	15
Horquilla soporte	0.07977	0.003412	15
Cruceta	0.002273	$8.993 \cdot 10^{-6}$	15

3.3.5 Última etapa de diseño del subsistema mecánico

3.3.5.1 Análisis cinemático

Se realiza un análisis cinemático que describe el movimiento del robot sin considerar las fuerzas que actúan sobre él, a fin de obtener las ecuaciones de restricciones cinemáticas de posición fundamentales para el estudio cinemático del Robot de 3GDL tipo rótula.

Se define el sistema de coordenadas (ver Figura 35), el robot cuenta con 2 cadenas cinemáticas RUE (Rotacional, Universal, esférico) y una cadena cinemática RU

(Rotacional, Universal), las cadenas cinemáticas se encuentran descritas por eslabones y juntas nombradas con letras y números respectivamente. Donde:

Juntas: *Universal:* E, C, D; *Rotacional:* F, G, H; y *Esférica:* A, B

Cadenas: *RUE:* F-D-B, G-C-A; *RU:* H-E

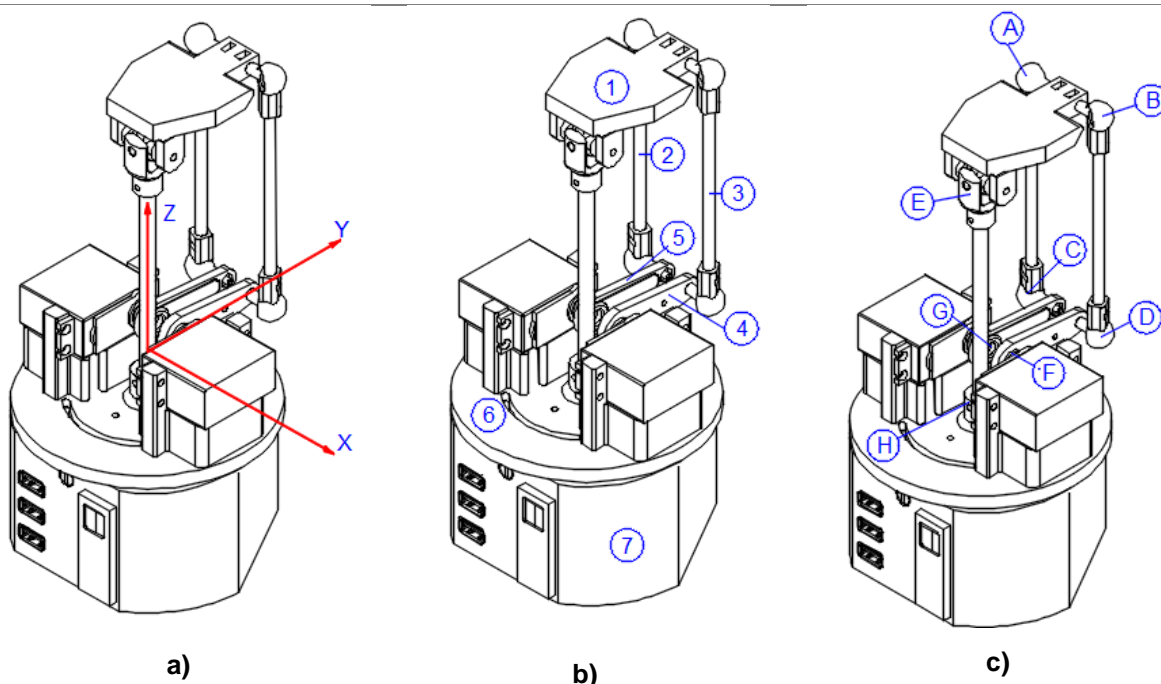


Figura 35 Esquema robot

Para determinación de los grados de libertad, se realiza mediante la ecuación 3.24.

$$GDL = 6(N - 1) - 5j_1 - 4j_2 - 3j_3 - 2j_4 - j_5 = 3 \quad (3.24)$$

Donde:

$N=7$ (5 eslabones y 2 plataformas)

$j_1=3$ (Juntas rotacionales F, G, H)

$j_2=3$ (Juntas universales E, C, D)

$j_3=2$ (Juntas esféricas A, B)

Por tanto, se concluye que el Robot tiene 3 grados de libertad, describe movimientos rotacionales en los ejes x, y, z con respecto a la plataforma del eslabón 1.

3.3.5.2 Modelo Matemático

La solución al problema de la cinemática directa consiste en encontrar el valor de la posición final del robot manipulador, esta solución es una función de los valores articulares, es decir, el valor traslacional o rotativo de las articulaciones.

En la actualidad existen diferentes métodos para resolver este problema, pero en el caso presente se hizo uso de las matrices de transformación homogénea, usando el método de la representación sistemática de Denavit-Hartenberg, el método propuesto ofrece la ventaja de conocer tanto la posición final de manipulador como la posición de cada una de sus articulaciones (Ramirez & Rubio, 2012).

3.3.5.3 Algoritmo de Denavit – Hartenberg (D-H) aplicando al robot

Para el análisis cinemático del robot se realizó utilizando el Algoritmo de Denavit – Hartenberg para ello se tomó como referencia (Fernández & Sotomayor, 2016).

Cada brazo se analiza por separado, y se establece la numeración de eslabones en cada brazo.

3.3.5.3.1 Análisis de la cadena de la base

En la Figura 36, se muestra esquema del diagrama de la primera cadena, donde se puede ver los ejes de coordenadas en cada articulación (Fernández & Sotomayor, 2016).

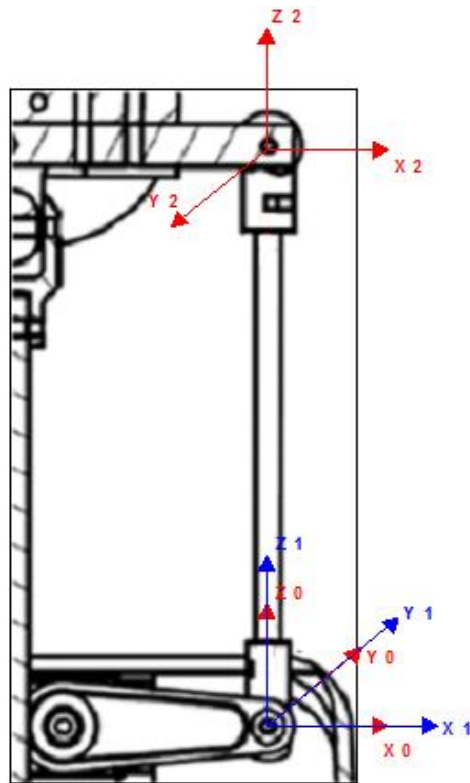


Figura 36 Cadena cinemática de la base.

En la Tabla 28 se muestran los parámetros D-H de la primera cadena.

Tabla 28

Resumen de los parámetros D-H de la primera cadena base.

Articulaciones	α	a	d	θ
1	0	0	0	q_1
2	0	0	d_1	0
3	q_3	0	d_2	q_2

El análisis de los grados de libertad mediante matrices de transformación, se encontrar la posición en los ejes coordenados x,y,z y la posición angular de las articulaciones (rotacional, universal, esférica).

Par Rotacional

Se analiza la rotación respecto al eje z obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (ver ecuación 3.25)

$$A_{RZH_0}^1 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Traslación del punto H al punto E en el eje z obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (ver ecuación 3.26)

$$A_{TE_1}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \overline{EH} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Par universal E

En el par universal E se analiza la rotación respecto al eje y obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea.

$$A_{RYE_2}^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Así como también se analiza la rotación respecto al eje x obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.28)

$$A_{RXE_3}^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Par esférico A

Traslación del punto A en los ejes coordenados x,y,z obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.29)

$$A_{TA_4}^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \overrightarrow{x_{EA}} \\ 0 & 1 & 0 & \overrightarrow{y_{EA}} \\ 0 & 0 & 1 & \overrightarrow{z_{EA}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Se realiza el análisis del sistema móvil respecto al fijo realizando la multiplicación de las matrices de transformación anteriormente mostradas para obtener la matriz que describa el movimiento de la articulación. (Ver ecuación 3.30) Para las siguientes ecuaciones se trabajará con la siguiente nomenclatura: $\cos = c$, $\sin = s$

$$T_{A_0}^5 = A_{RZH_0}^1 * A_{TE_1}^2 * A_{RYE_2}^3 * A_{RXE_3}^4 * A_{TA_4}^5 \quad (3.30)$$

Después de realizar la multiplicación de las matrices de transformación se obtiene la matriz de rotación (R_A) y traslación final (P_A) mostrados a continuación:

$$R_A = \begin{bmatrix} c(\varphi) c(\theta) & c(\varphi) s(\alpha) s(\theta) - c(\alpha) s(\varphi) & s(\alpha) s(\varphi) + c(\alpha) \cos(\varphi) s(\alpha) \\ s(\varphi) c(\theta) & c(\varphi) c(\alpha) + s(\alpha) s(\varphi) s(\theta) & s(\varphi) c(\alpha) s(\theta) - s(\alpha) c(\varphi) \\ -s(\theta) & s(\alpha) c(\theta) & c(\alpha) c(\theta) \end{bmatrix}$$

$$P_A = \begin{bmatrix} 16s(\alpha)s(\varphi) - 19.5c(\varphi)c(\theta) - 50c(\alpha)s(\varphi) + 16c(\alpha)c(\varphi)s(\theta) + 50c(\varphi)s(\alpha)s(\theta) \\ 50c(\alpha)c(\varphi) - 19.5s(\varphi)c(\theta) - 16s(\alpha)c(\varphi) + 16c(\alpha)s(\varphi)s(\theta) + 50s(\varphi)s(\alpha)s(\theta) \\ 19.5s(\theta) + 50s(\alpha)c(\theta) + 16c(\alpha)c(\theta) + 79.54 \end{bmatrix}$$

3.3.5.3.2 Análisis de la cadena HGC

En la Figura 37 se muestra esquema del diagrama de la primera cadena HGC, donde se puede ver los ejes de coordenadas en cada articulación (Fernández & Sotomayor, 2016).

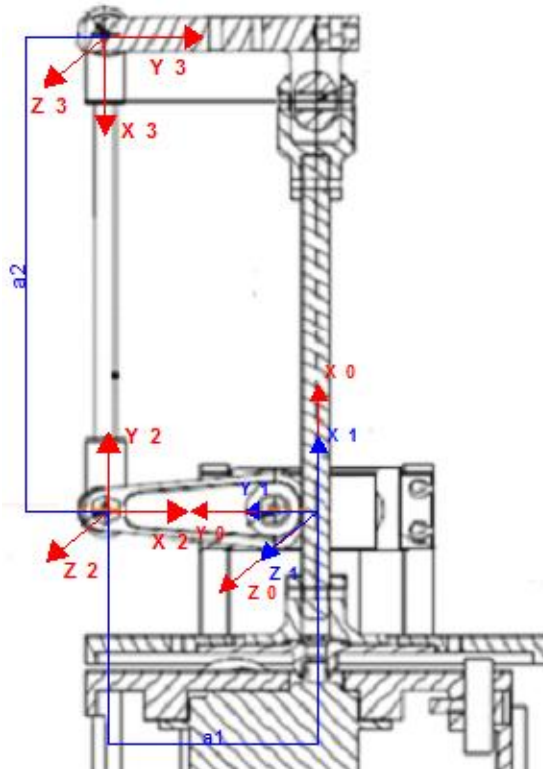


Figura 37 Cadena cinemática HGC

En la Tabla 29 se muestran los parámetros D-H de la cadena HGC.

Tabla 29

Resumen de los parámetros D-H de la cadena HGC

Articulaciones	α	a	d	θ
1	0	0	0	q_1
2	0	a_1	0	q_2
3	0	a_2	0	q_3

El análisis de los grados de libertad mediante matrices de transformación, se encontrar la posición en los ejes coordenados x,y,z y la posición angular de las articulaciones (rotacional, universal, esférica). Para las siguientes ecuaciones se trabajará con la siguiente nomenclatura: $\cos = c$, $\sin = s$

Par Rotacional H

Se analiza la rotación respecto al eje z obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.80)

$$C_{RZH_0}^1 = \begin{bmatrix} c(\varphi) & -s(\varphi) & 0 & 0 \\ s(\varphi) & c(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Par Rotacional G

Traslación del punto G en los ejes coordenados x,y obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.81)

$$C_{RZH_0^1} C_{TG_1^2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{HG} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{HG} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

En el par rotacional en G se analiza la rotación respecto al eje x obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.82)

$$C_{RXG_2^3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(q_2) & -s(q_2) & 0 \\ 0 & s(q_2) & c(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Par Universal en C

Traslación del punto C en el eje y obteniendo la siguiente matriz de transformación homogénea. (Ver ecuación 3.83)

$$C_{TC_3^4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_{GC} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Después de realizar la multiplicación de las matrices de transformación se obtiene la matriz de rotación (R_C) y traslación final (P_C) mostrados a continuación:

$$R_C = \begin{bmatrix} c(\varphi) & -c(q_2)s(\varphi) & s(q_2)s(\varphi) \\ s(\varphi) & c(\varphi)c(q_2) & -s(q_2)c(\varphi) \\ 0 & s(q_2) & c(q_2) \end{bmatrix}$$

$$P_C = \begin{bmatrix} -19.5c(\varphi) - 10s(\varphi) - 40c(q_2)s(\varphi) \\ 10c(\varphi) - 19.5s(\varphi) + 40\cos(q_2)c(\varphi) \\ 40s(q_2) \end{bmatrix}$$

3.3.5.4 Modelamiento dinámico

El modelamiento dinámico permite relacionar el giro de cada motor con el momento de torsión del mismo. Se inicia estableciendo las restricciones que se describen a continuación:

- Los ejes de desplazamiento son perpendiculares a la superficie de trabajo.
- Se asume que no existe deslizamiento entre la superficie y los acoples.
- La estructura del robot es totalmente rígida.

Para realizar el modelamiento dinámico, es necesario realizar un análisis cinemático, para lo cual se considera la Figura 38 . Se define las siguientes variables:

- r_i, r_d = radio de los actuadores izquierdo y derecho respectivamente.
- l = distancia entre actuadores
- θ_i, θ_d = ángulo de giro de los actuadores izquierdo y derecho respectivamente
- $\dot{\theta}_i, \dot{\theta}_d$ = velocidad angular de los actuadores izquierdo y derecho respectivamente
- ω = velocidad angular del punto medio del robot
- φ = ángulo de giro del robot respecto al sistema de coordenadas x,y
- v = velocidad lineal del punto medio del robot

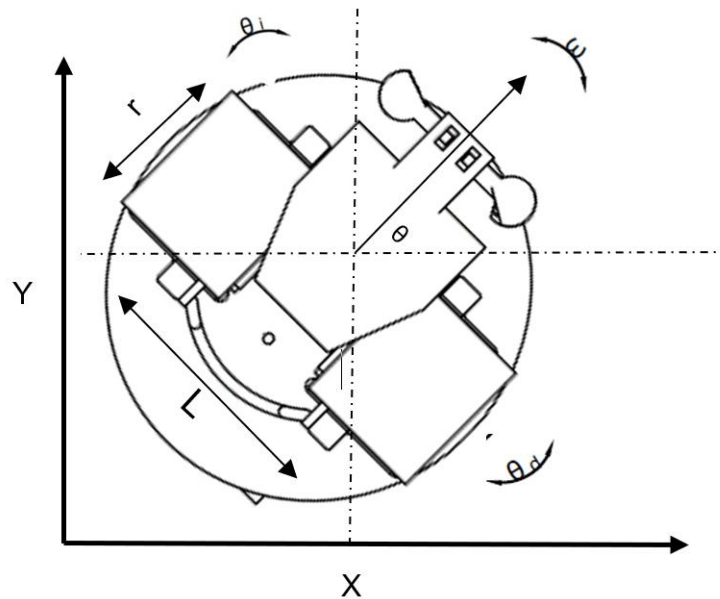


Figura 38 Variables de la configuración diferencial para el modelamiento dinámico

Para el modelamiento dinámico se utiliza el método de Euler-Lagrange representado en la ecuación 3.35.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau \quad (3.35)$$

Donde:

- q, \dot{q} = vectores de estado
- τ = vector de fuerzas y pares aplicados a las coordenadas generalizadas
- $L(q, \dot{q})$ = Lagrangiano

El Lagrangiano se representa en la ecuación 3.36.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.36)$$

La energía cinética del robot se expresa como la sumatoria de la energía cinética del cuerpo K_c y las energías cinéticas de los brazos K_{ri} y K_{rd} , como se expresa en la ecuación (3.37).

$$K = K_c + K_{ri} + K_{rd} \quad (3.37)$$

Donde K_c está dada por la energía cinética debido a la velocidad lineal (traslación) y la energía cinética debido a la velocidad angular (rotación) como se indica en la ecuación (3.38):

$$K_c = \frac{1}{2}M \times v^2 + \frac{1}{2}I_c \times \omega^2 \quad (3.38)$$

Donde I_c es el momento de inercia del cuerpo del robot con respecto al centro de giro representado en la ecuación 3.39.

$$I_c = \frac{1}{2}M \times l^2. \quad (3.39)$$

La energía cinética de cada actuador viene dada por las ecuaciones (3.40) y (3.41)

$$K_{ri} = \frac{1}{2}I_r \times \dot{\theta}_i^2 \quad (3.40)$$

$$K_{rd} = \frac{1}{2}I_r \times \dot{\theta}_d^2 \quad (3.41)$$

Donde I_r es el momento de inercia de cada actuador que viene dado por la ecuación 3.42.

$$I_r = \frac{1}{2}m \times r^2 \quad (3.42)$$

Se reemplaza las ecuaciones anteriores en la ecuación (3.37) para obtener el valor de K de la ecuación 3.43.

$$K = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{4}Ml^2\omega^2 + \frac{1}{4}mr^2\dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{4}mr^2\dot{\theta}_d^2 \quad (3.43)$$

Al considerar al robot como un cuerpo rígido, la velocidad lineal del centro de masa se obtiene por el promedio de las velocidades lineales de sus extremos (donde se encuentran los servomotores). Por tanto, se define la velocidad lineal del robot en la ecuación (3.44) y la velocidad angular en la ecuación (3.45)

$$v = \frac{r(\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_d)}{2} \quad (3.44)$$

$$\omega = \frac{r(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_d)}{l} \quad (3.45)$$

Se reemplazan las ecuaciones (3.44) y (3.45) en la ecuación (3.43) y se obtiene la ecuación (3.46)

$$K = \frac{r^2}{8}(3M + 2m)(\dot{\theta}_i^2 + \dot{\theta}_d^2) - \frac{Mr^2}{4}\dot{\theta}_i\dot{\theta}_d \quad (3.46)$$

Se reemplazan las variables con los valores que se tiene como datos y se obtiene la ecuación (3.47):

- Masa total del robot $M_T = M + 2m = 2 \text{ kg}$
- Masa de los actuadores $m = 0.55 \text{ kg}$
- Masa total del robot $M = M_T - 2m = 1.89 \text{ kg}$
- Radio de la rueda $r = 0.12 \text{ m}$

$$K = 0.012186 (\dot{\theta}_l^2 + \dot{\theta}_d^2) - 0.006804 \dot{\theta}_l \dot{\theta}_d \quad (3.47)$$

Para el análisis de la energía potencial se considera la superficie en donde se movilice el robot, en este caso no existe energía potencial porque no hay cambio de altura. Por lo tanto, la energía potencial se muestra en la ecuación 3.48.

$$U = M_T g h = 0 \quad (3.48)$$

Posteriormente se obtiene el Lagrangiano de la ecuación 3.49.

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) = K(q, \dot{q})$$

$$L = 0.012186 (\dot{\theta}_l^2 + \dot{\theta}_d^2) - 0.006804 \dot{\theta}_l \dot{\theta}_d \quad (3.49)$$

A partir de la ecuación (3.36) se aplica la ecuación de Euler-Lagrange para el estado θ_i .

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_l} \right] = 0.024372 \ddot{\theta}_l - 0.006804 \ddot{\theta}_d$$

Reemplazando en la ecuación (3.35) se obtiene la ecuación (3.50)

$$0.024372 \ddot{\theta}_l - 0.006804 \ddot{\theta}_d = \tau \quad (3.50)$$

Posteriormente, a partir de la ecuación (3.49) se aplica la ecuación de Euler-Lagrange para el estado θ_d

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_d} \right] = 0.024372 \ddot{\theta}_d - 0.0806804 \ddot{\theta}_l$$

Reemplazando en la ecuación (3.36) se obtiene la ecuación (3.51)

$$0.024372 \ddot{\theta}_d - 0.0806804 \ddot{\theta}_l = \tau \quad (3.51)$$

Se representan las ecuaciones (3.50) y (3.51) en forma matricial.

$$\begin{bmatrix} 0.024372 & -0.0806804 \\ -0.0806804 & 0.024372 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_l \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_l \\ \tau_d \end{bmatrix}$$

3.3.5.5 Diseño Final

En la Figura 39 y Figura 40 se muestra las partes de la carcasa del robot.

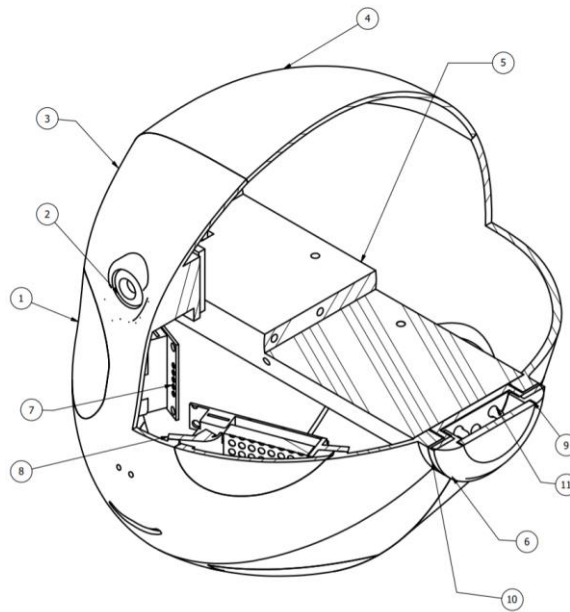


Figura 39 Diseño carcasa.

11	Led_orejas	2		LEAR11	
10	Orejas	2	PLA	EAR10	
9	Tapas_orejas	2	PLA	TEAR09	
8	Ojo_Izquierdo	1	PLA	EYE08	
7	Matriz_led	1	Generico	LMAT07	Matriz Leds 8x8 Max7219
6	Base_oreja	2	PLA	BEAR06	
5	Soporte	1	Generico	SUPP05	
4	Perfil_cabeza_espalda	1	PLA	HEAD04	
3	Perfil_cabeza_frontal	1	PLA	HEAD03	
2	Camara	2	Generico	WEB02	12.0 MP/CMOS de 640 x 480 (VGA)
1	Lentes	1	Acrilico	GLAS01	
Nº	Denominacion	Cant	Material	Codigo	Observaciones

Figura 40 Partes diseño carcasa.

En la Figura 41 y Figura 42 se muestra las partes de la estructura del robot.

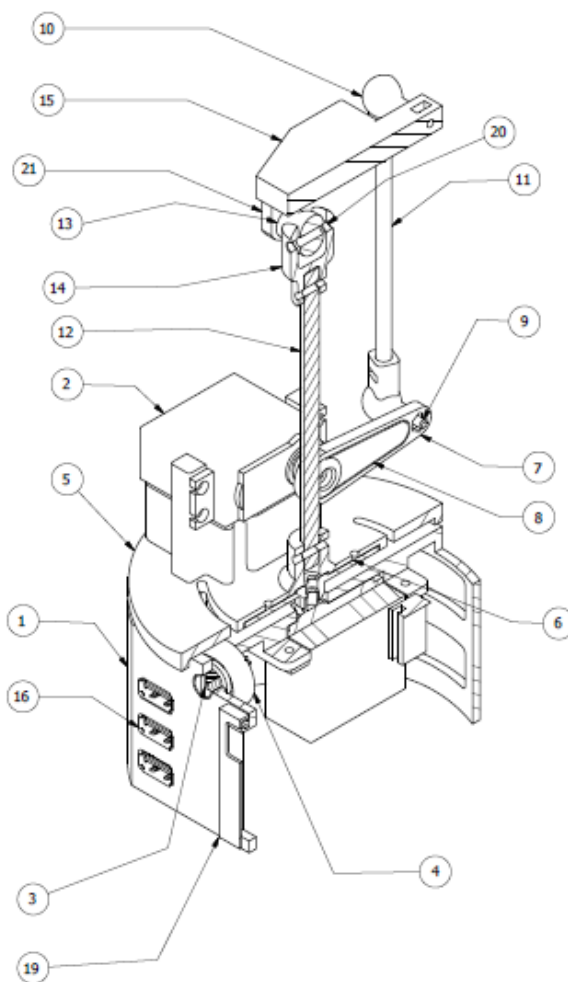


Figura 41 Diseño estructura.

21	Pasador cruceta Y	1	ASTM-A36	PINCY	
20	Pasador cruceta X	1	ASTM-A36	PINCX	
19	Tapa_Arduino	1	PLA	ARDTAP	
18	Arduino UNO	1	Generico	ARD1	ATMEGA-328P
16	USB	3	Generico	USB20	USB 2.0 Hembra
15	Base_cardan	1	PLA	BCA15	
14	Horquilla	1	PLA	HO14	
13	Cruceta	1	PLA	CR13	
12	EjeColumna	1	ASTM-A36	PIN12	
11	Eje_brazo	2	ASTM-A36	PIN11	
10	Rotula02	4	PLA	BJ10	
9	Esfera	4	ASTM-A36	SP09	
8	Eslabon1	2	Generico	LINKTW2	
7	Acople1	2	PLA	COUP07	
6	Eslabon2	1	Generico	LINKTW1	
5	Base_movil_ejeZ	1	PLA	MBAXI5	
4	Rodamiento	3	Generico	TREAD	DIN 625 SKF - SKF 608-Z
3	Pasador_Rodamiento	3	ASTM-A36	PIN03	
2	Servo motor	3		TWPRO	MG996R 9.4 kg/cm
1	Base_Mecanismo	1	PLA	BAS01	MDF 3mm
Nº	Denominacion	Cant	Material	Codigo	Observaciones

Figura 42 Partes diseño estructura

3.4 Módulo 2: Subsistema Electrónico

3.4.1 Medio de comunicación de datos

El medio de comunicación de datos permitirá la comunicación entre el robot y la computadora. Se seleccionó el modo de comunicación serial D-SUN USB a TTL el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 2.

3.4.2 Dispositivo para representación de expresiones

Se selecciono como dispositivo para representación matriz de LEDs, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 2.

3.4.3 Fuente de alimentación

Para el dimensionamiento de la fuente se considera el voltaje y corriente máxima de operación de los siguientes actuadores: los servomotores MG996R y las matrices led de 8x8 (rojo opaco), que se muestra en la Tabla 30. Además, se debe tomar en cuenta que el accionamiento de los servomotores no es simultaneo, es decir, que función uno a la vez.

Tabla 30

Procedimiento para la selección de la fuente de alimentación

Procedimiento para la selección de la fuente de alimentación		
Actuador	Voltaje nominal [V]	Consumo máximo [A]
Servomotor MG996R	5	0.9
Matriz led 8x8	5	0,48
	Total [A]	1,38

Fuente: (Caldas, 2017)

Se seleccionó una fuente de alimentación de 5V dc y 2A que es lo que se requiere para el funcionamiento de los actuadores, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 2.

3.5 Módulo 3: Subsistema de Control

En el subsistema de control se considera el controlador que rige los movimientos del robot. Considera la herramienta informática en la que dicho controlador trabajará.

3.5.1 Procesador

El componente o dispositivo electrónico que permitirá procesar el programa de visión artificial y el movimiento del robot. Se selecciono la PC como procesador, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 3.

3.6 Módulo 4: Subsistema Visión

3.6.1 Sensor de la cámara

Los sensores por implementar son dos cámaras encargadas de la adquisición de las imágenes en el sistema de visión artificial. Se selecciono la Cámara Web como cámara, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 4.

3.6.2 Software de procesamiento de imágenes

El software de procesamiento de imágenes permite realizar procesamiento de imágenes obtenidas a través de la cámara Web. Se selecciono la Open CV (Python) como software de procesamiento de imágenes, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 4.

3.6.3 Sistema de visión artificial estéreo

Permite detectar objetos y realizar un seguimiento de los mismos. Se seleccionó dos cámaras paralelas para el sistema de visión artificial estéreo, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 4.

Mediante la combinación de dos cámaras se consiguiera determinar la geometría de la escena sin utilizar iluminación dedicada o proyectores.

3.6.4 Modelamiento matemático del sistema de visión estéreo

En la Figura 43 se muestra la posición de las cámaras en paralelo, se toma como referencia la cámara izquierda para establecer el origen del sistema. Para el modelamiento se considera las dos cámaras colocadas paralelamente y separadas una distancia fija.

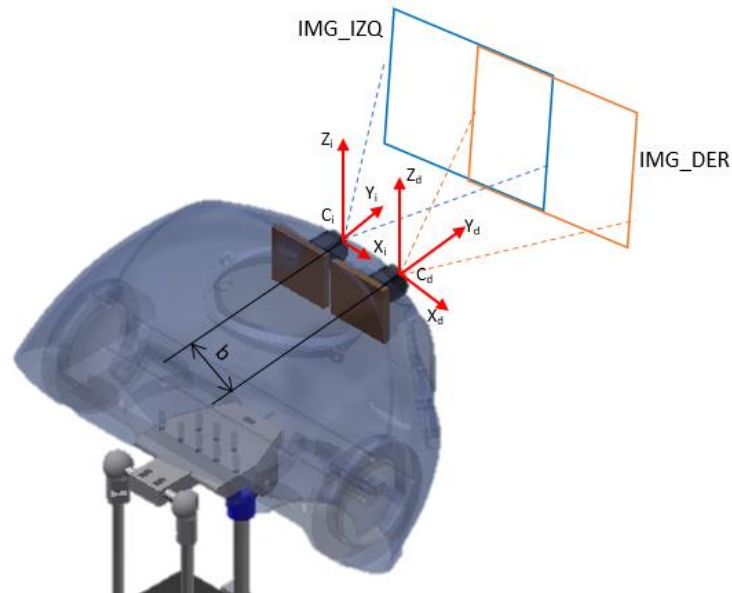


Figura 43 Sistema de visión estereoscópico

Sean $OXYZ_m$ el sistema de referencia del mundo y $OXYZ_c$ el sistema de referencia de la cámara. Mediante matrices homogéneas se calcula la proyección de cualquier punto del mundo sobre la cámara de acuerdo con el siguiente proceso (Arévalo Celi, 2018):

1. Se eleva el sistema de coordenadas a una altura h con respecto al plano del mundo como se indica en la Figura 44. Para calcular la proyección se usa la ecuación 3.87.

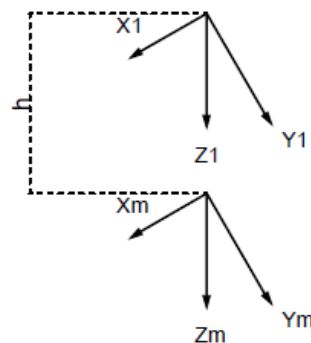


Figura 44 Desplazamiento de altura h

$$x_1 = T_h \cdot x_0 \quad (3.52)$$

Donde:

- T_h es la matriz de translación. (ver ecuación 3.88)
- x_0 : es el sistema de referencia.

$$T_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

2. Las cámaras no presentan movimiento rotacional en los ejes OX (cabeceo), OY (balanceo) ni OZ (guiñado).
3. Únicamente para la cámara derecha, se desplaza el sistema de coordenadas sobre el eje OX una distancia b (Ver Figura 43), considerando que se tomó el sistema de coordenadas de la cámara izquierda como referencia. Por tanto, para la cámara izquierda se utiliza la matriz identidad.

Mediante la ecuación 3.89 se muestra el cálculo de la matriz de la cámara derecha y la ecuación 3.91 se muestra el cálculo de la matriz de la cámara izquierda.

$$x_{c,d} = T_{b,d} \cdot x_1 \quad (3.54)$$

Donde:

- $T_{b,d}$ es la matriz de translación en el eje OX para la cámara izquierda. (ver ecuación 3.90)
- x_1 : es el sistema de referencia de la cámara de las cámaras.

$$T_{b,d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$x_{c,i} = T_{b,i} \cdot x_1 \quad (3.56)$$

Donde:

- $T_{b,i}$ es la matriz de translación en el eje OX para la cámara izquierda. (ver ecuación 3.92)

$$T_{b,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

4. Se proyecta la imagen a través de OY, con una distancia focal f , de acuerdo con el modelo pin-hole (Jimenez, 2016).

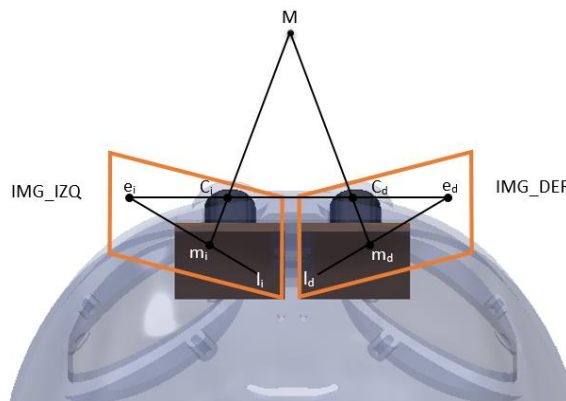


Figura 45 Proyección de un punto en el sistema estéreo

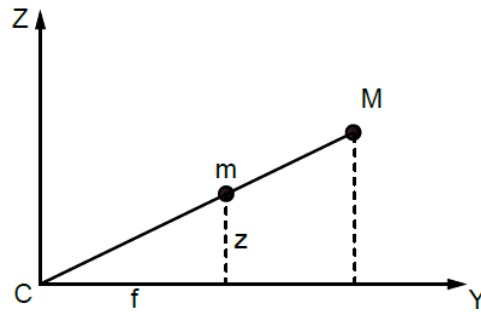


Figura 46 Modelo pin-hole para el plano YZ

5. Se define las coordenadas de $M = (X, Y, Z)$ y $m = (x, y, z)$ (Ver Figura 45), de acuerdo a la geometría de la Figura 46 se establece la relación de semejanza de triángulos, tanto para el plano YZ como para el plano XY, obteniendo las relaciones que se describen en las ecuaciones 3.41 y 3.42.

$$x = \frac{fX}{Y} \quad (3.58)$$

$$z = \frac{fZ}{Y} \quad (3.59)$$

Se expresa las ecuaciones 3.58 y 3.59 en forma de coordenadas homogéneas, ver la ecuación 3.60.

$$Y \begin{bmatrix} x \\ 1 \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fX \\ Y \\ fZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Para una representación reducida, se considera que las coordenadas X, Y, Z del punto M , se definen respecto a la cámara por lo que se remplazan por x_c, y_c, z_c y se reemplazan los valores de fX, Y, fZ por u_p, v_p, s_p . Donde se obtiene las ecuaciones 3.61 y 3.62.

$$x_p = \frac{u_p}{v_p} \quad (3.61)$$

$$z_p = \frac{s_p}{v_p} \quad (3.62)$$

6. Se calcula la matriz de proyección formada por una matriz 3x3 (ver ecuación 3.47). Se traducen las coordenadas a milímetros de pixeles y se traslada el origen de coordenadas a la esquina superior izquierda de la imagen (Ver Figura 47).

$$u_j = T_k \cdot u_p = \begin{bmatrix} k_x & 0 & C_x \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_z & C_z \end{bmatrix} u_p \quad (3.63)$$

Donde k_x y k_z se refieren a la resolución espacial expresada en pixeles/mm, y C_x , C_z son las coordenadas de la proyección del centro óptico de la cámara expresada en pixeles.

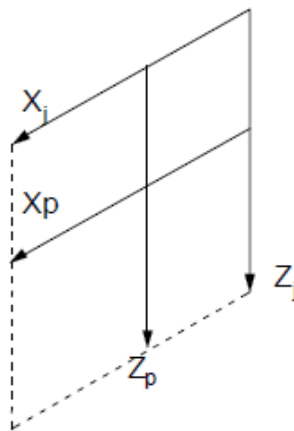


Figura 47 Escala y cambio de origen

Finalmente se define la matriz de coordenadas globales para ello se utiliza la ecuación 3.64, se reemplaza las coordenadas globales para las cámaras izquierda y derecha se muestran en las ecuaciones 3.65 y 3.66 respectivamente.

$$u_j = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = (T_k \cdot T_f \cdot T_b \cdot T_h) \cdot x_m = T_{global} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix}_{izquierda} = \begin{bmatrix} f k_x & 0 & f C_x & h f C_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_z & f C_z & h f C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

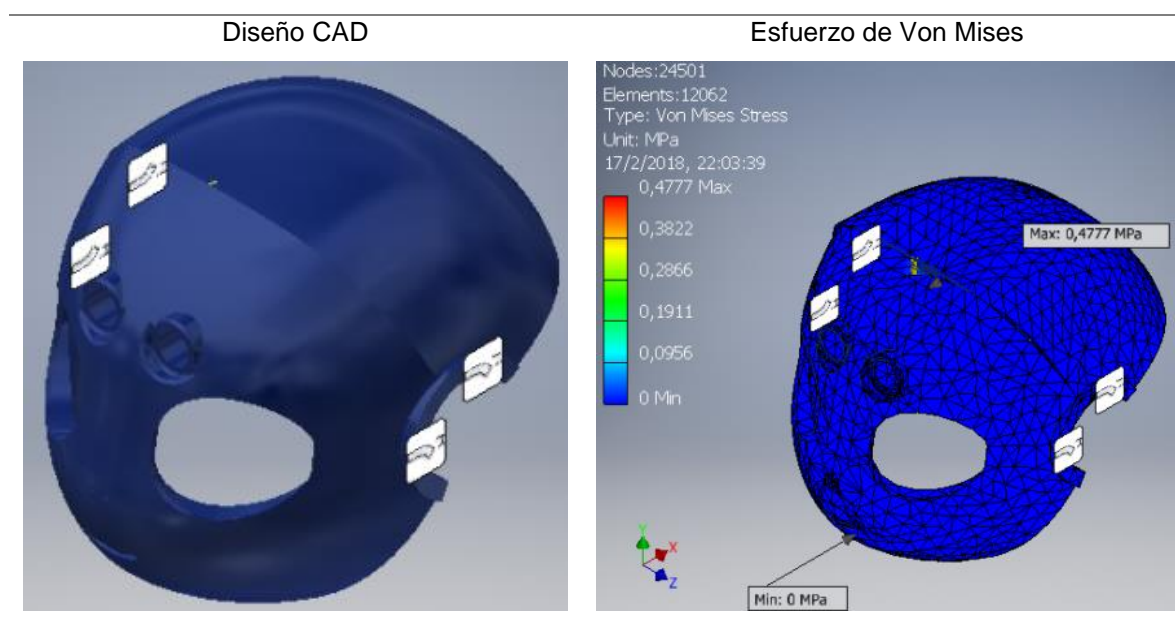
$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix}_{derecha} = \begin{bmatrix} f k_x & 0 & f C_x & h f C_x - b f k_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_z & f C_z & h f C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

3.7 Módulo 5: Subsistema Diseño de la carcasa

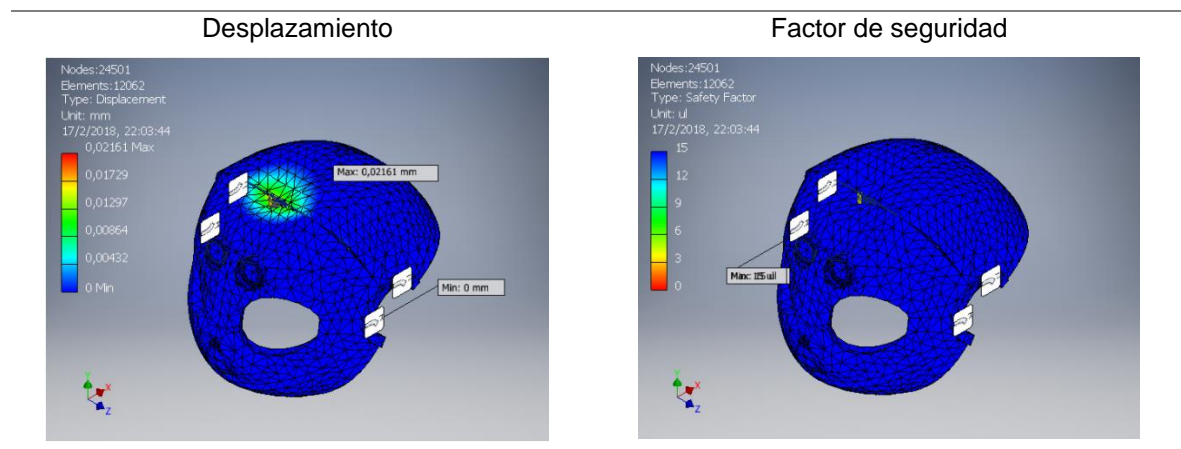
El diseño de la carcasa se muestra en la Tabla 31, la selección del material PLA de la carcasa del robot, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 5.

Tabla 31

Diseño de la cabeza del robot.



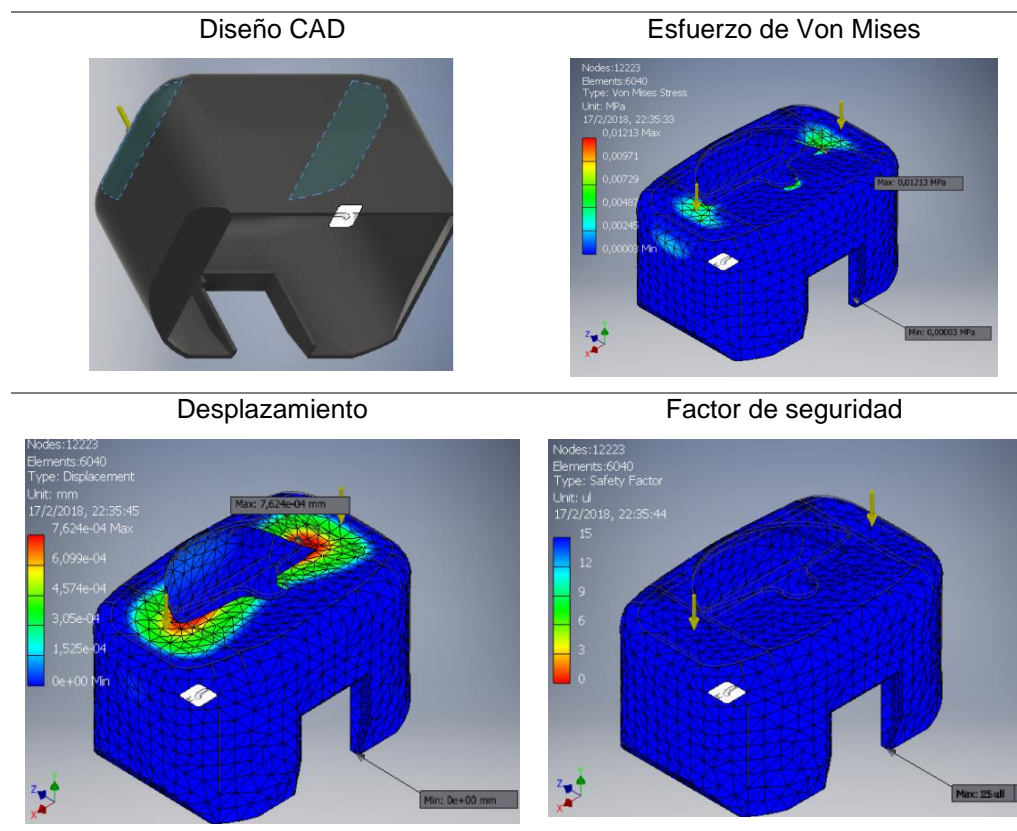
CONTINÚA →



El diseño de la base de la carcasa se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32

Diseño de la base.



En la Tabla 33 se puede observar un resumen del esfuerzo, desplazamiento, y factor de seguridad de cada pieza de la estructura mecánica.

Tabla 33

Resultados análisis CAE

	Esfuerzo (MPa)	Desplazamiento (mm)	Factor de seguridad
Base Fija	0.02816	0.001283	15
Base Móvil	0.03278	0.001597	15
Acoples motores	0.1584	$5.512 \cdot 10^{-4}$	15
Rótula	0.00469	$2.68 \cdot 10^{-5}$	15
Horquilla eje	0.001102	$1.609 \cdot 10^{-5}$	15
Horquilla soporte	0.07977	0.003412	15
Cruceta	0.002273	$8.993 \cdot 10^{-6}$	15

Se tiene un factor de seguridad de 15 por lo que se puede asegurar que las piezas soportarán las cargas a las que será sometido.

3.8 Módulo 6: Subsistema Diseño de la interfaz

Para el diseño de la interfaz se utilizará el software Tkinter, el procedimiento de selección ver en la sección Anexo 6.

En la Figura 48 se muestra el modelo de navegación para la interfaz HMI, donde el usuario podrá interactuar con el robot. En la Figura 49 se muestra la plantilla en la cual se basará las diferentes pantallas de la interfaz HMI.

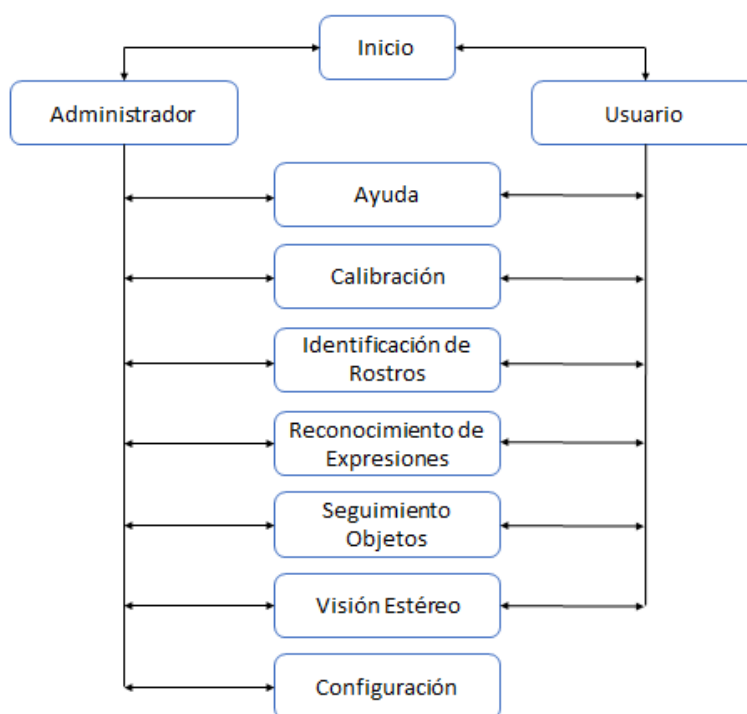


Figura 48 Modelo de navegación de las ventanas.

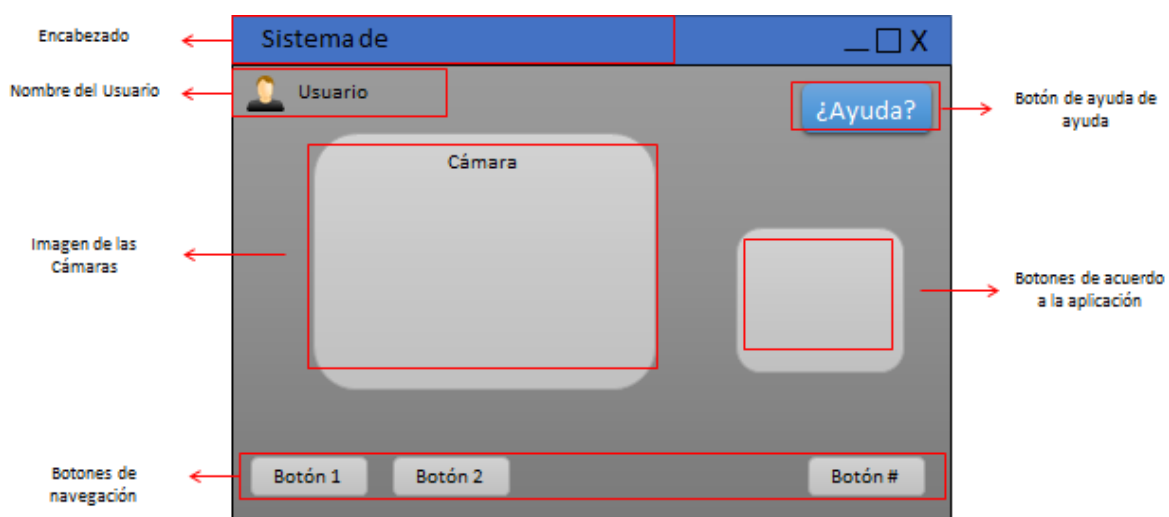


Figura 49 Diseño de plantilla.

3.9 Resumen

En esta sección se describe los diferentes subsistemas que conforman la plataforma del robot. Los subsistemas están compuestos por:

- Subsistema mecánico está compuesto de: mecanismo 3 GDL, material estructura, el actuador, y material de los ejes.
- Subsistema eléctrico está compuesto de: medio de comunicación de datos, fuente de alimentación y el dispositivo para representación de expresiones.
- Subsistema de control está compuesto por el procesador, el software de control.
- Subsistema de visión está compuesto de sensor cámara, software de procesamiento de imágenes y el sistema de visión artificial estéreo.
- Subsistema de diseño de la carcasa está compuesto por el material de la carcasa.
- Subsistema de diseño de la interfaz está compuesto por el software de interfaz humano máquina HMI.

Cada subsistema representa una parte importante del robot. Se realiza la selección del mecanismo, el software y hardware para posteriormente continuar con la implementación.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

El capítulo describe la implementación del diseño del robot, es decir la construcción del robot desde la estructura, el desarrollo del hardware y software para el robot, incluyendo las pruebas respectivas de la visión artificial.

4.1 Construcción de la estructura del robot

Para la construcción del mecanismo o estructura interna del robot se imprimió el diseño 3D, realizado en la sección 3, para ello se utilizó una impresora 3D y el material PLA.



Figura 50 Impresión 3D de la estructura interna del robot.

El diagrama de la Figura 51 muestra los pasos a seguir para realizar la impresión 3D de las piezas que conforman la estructura mecánica del robot.

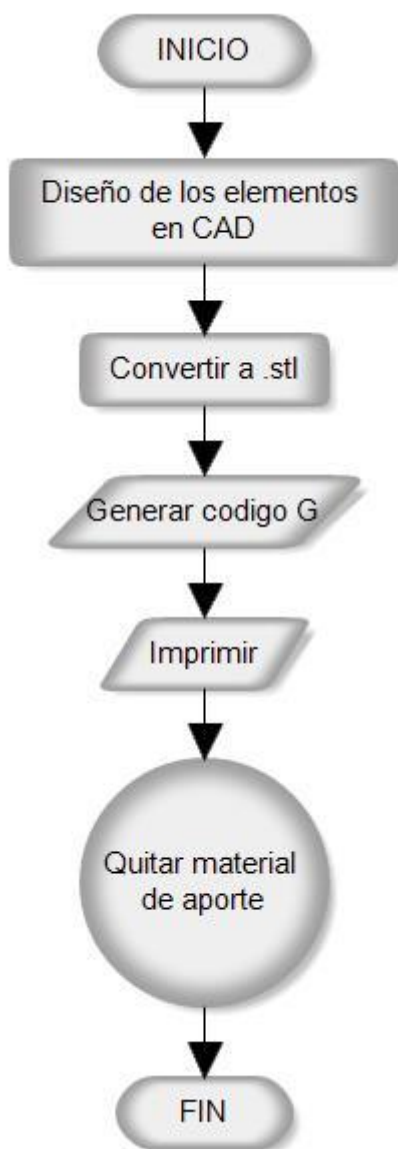
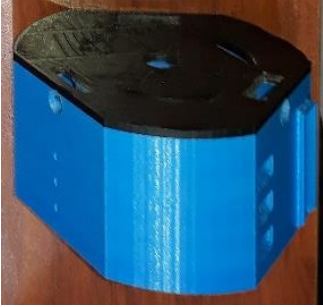









Figura 51 Diagrama de flujo impresión 3D.

En la Tabla 34 se muestra las impresiones 3D del robot, correspondiente al diseño CAD de cada pieza correspondiente a la parte interna del robot.

Tabla 34

Impresiones 3D de la estructura interna del Robot.

<p>Base fija</p> 	<p>Base móvil</p> 
<p>Acoples motores</p> 	<p>Rótula</p> 
<p>Horquilla eje</p> 	<p>Horquilla soporte</p> 
<p>Eje cruceta Y</p> 	<p>Eje cruceta X</p> 

Se realizó el maquinado de ejes cuyos pasos se muestran en la Figura 52.

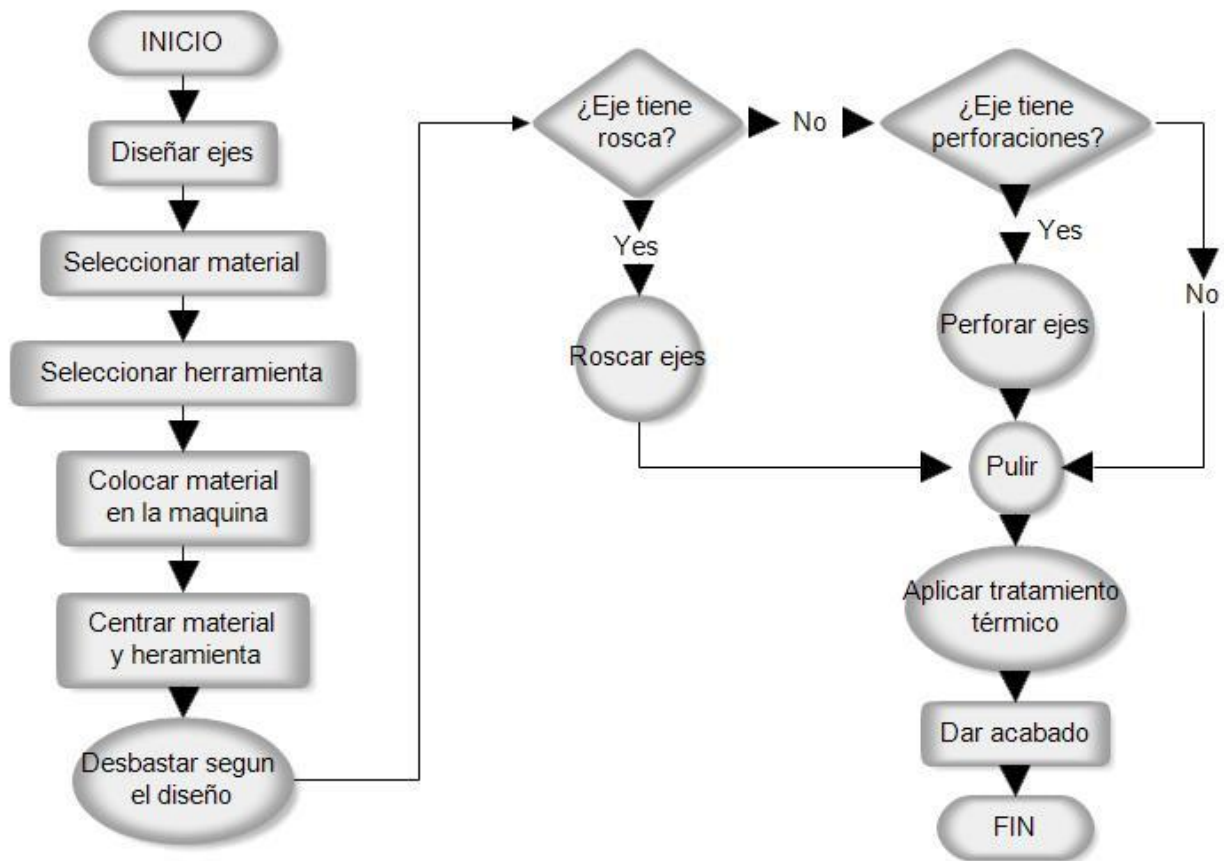


Figura 52 Diagrama de flujo maquinado ejes

Una vez impresas las piezas internas del robot, se realiza el ensamblaje de cada pieza (ver Figura 53). Se empezará armando la base fija y la móvil una sobre otra, y así sucesivamente hasta finalizar el ensamblaje. Una parte importante del mecanismo es la instalación de los servomotores en sobre la base móvil (ver Figura 54).



Figura 53 Ensamble de la estructura interna.

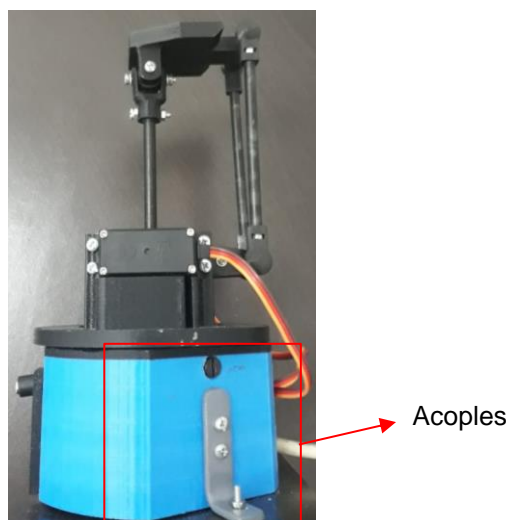


Figura 54 Instalación de los acoples.

4.2 Construcción de la carcasa del robot

La carcasa del robot es la estructura externa del robot, se realizó mediante los diseños desarrollados en el software CAD para posteriormente ser impresos en una impresora 3D utilizando el material PLA, como se muestra en el diagrama de la Figura 55.

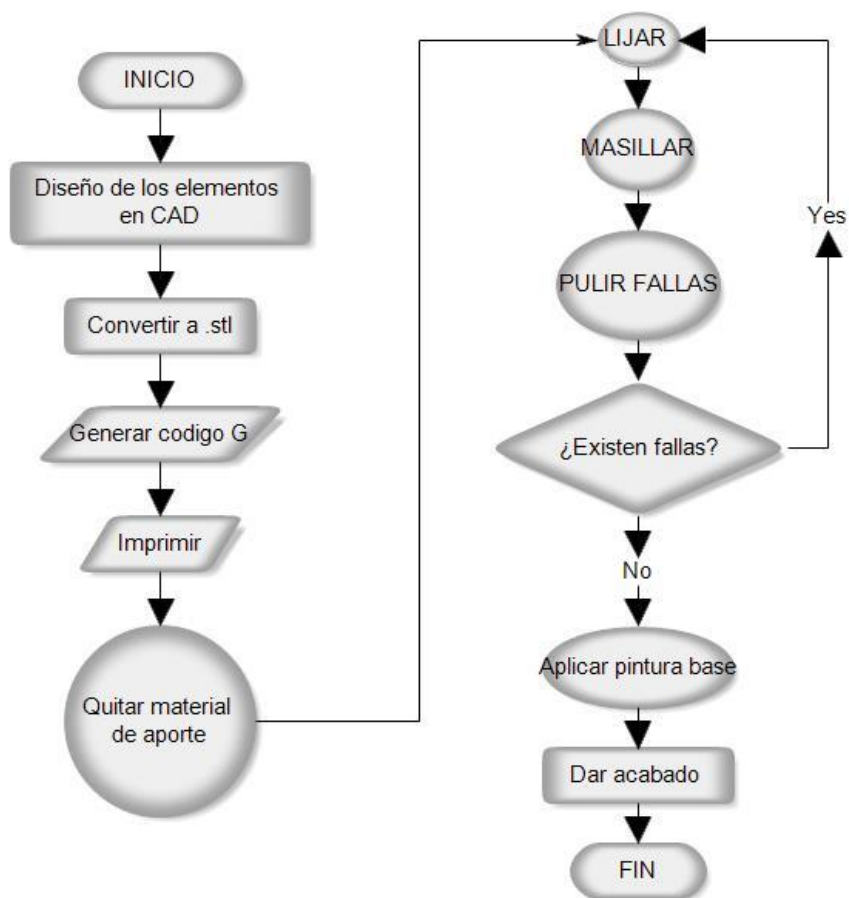


Figura 55 Diagrama de flujo implementación carcasa robot

En la Figura 56 se muestra la impresión de la estructura externa del robot.



Figura 56 Impresión 3D de la estructura externa del robot.

Tabla 35*Impresiones 3D de la carcasa del Robot.*

Una vez impresas las piezas de la carcasa del robot, se realiza un proceso de mancillado, lijado y posteriormente pintado, para luego ensamblar las piezas impresas del cuerpo del robot una por una (ver Tabla 35).

4.3 Implementación de hardware de control

4.3.2 Instalación de dispositivos electrónicos

Para la instalación de los dispositivos electrónicos se realizaron los pasos mostrados en la Figura 61.

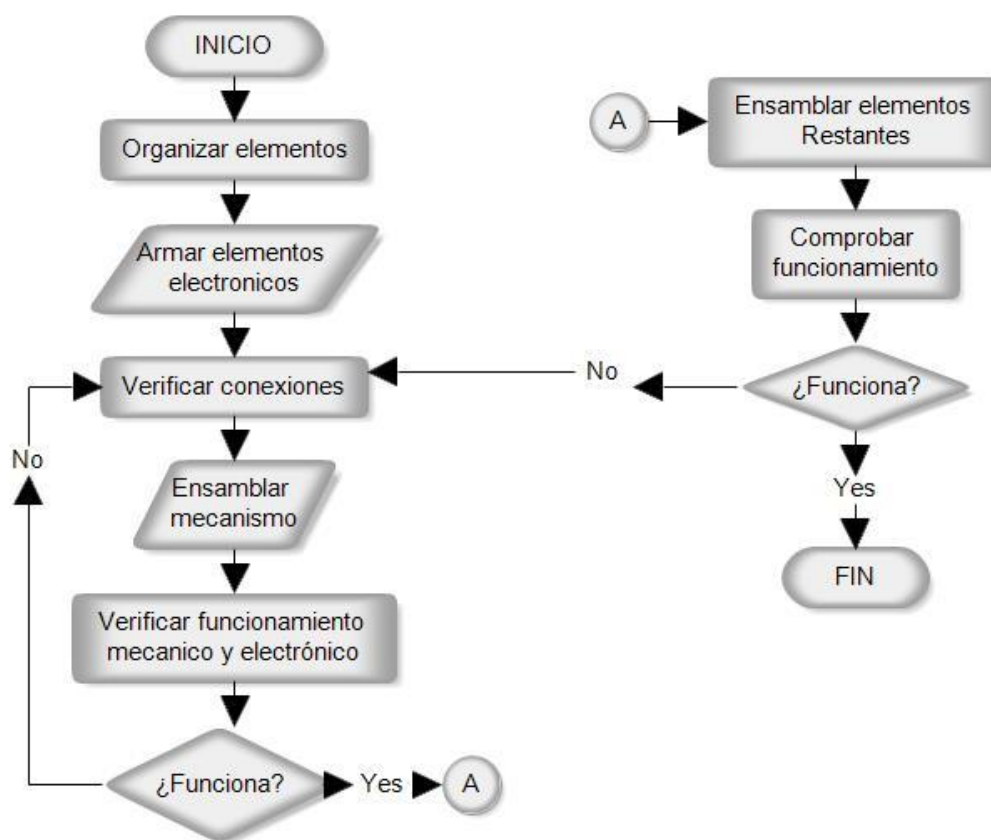


Figura 57 Diagrama de flujo conexiones componentes electrónica

4.3.2.1 Instalación de la tarjeta de control

En la Figura 58 se muestra el esquema de conexión de la tarjeta de control con diferentes dispositivos electrónicos, como las matrices led para las expresiones del robot,

los servomotores que permitirán el movimiento del robot y la conexión que va de la tarjeta a la PC.

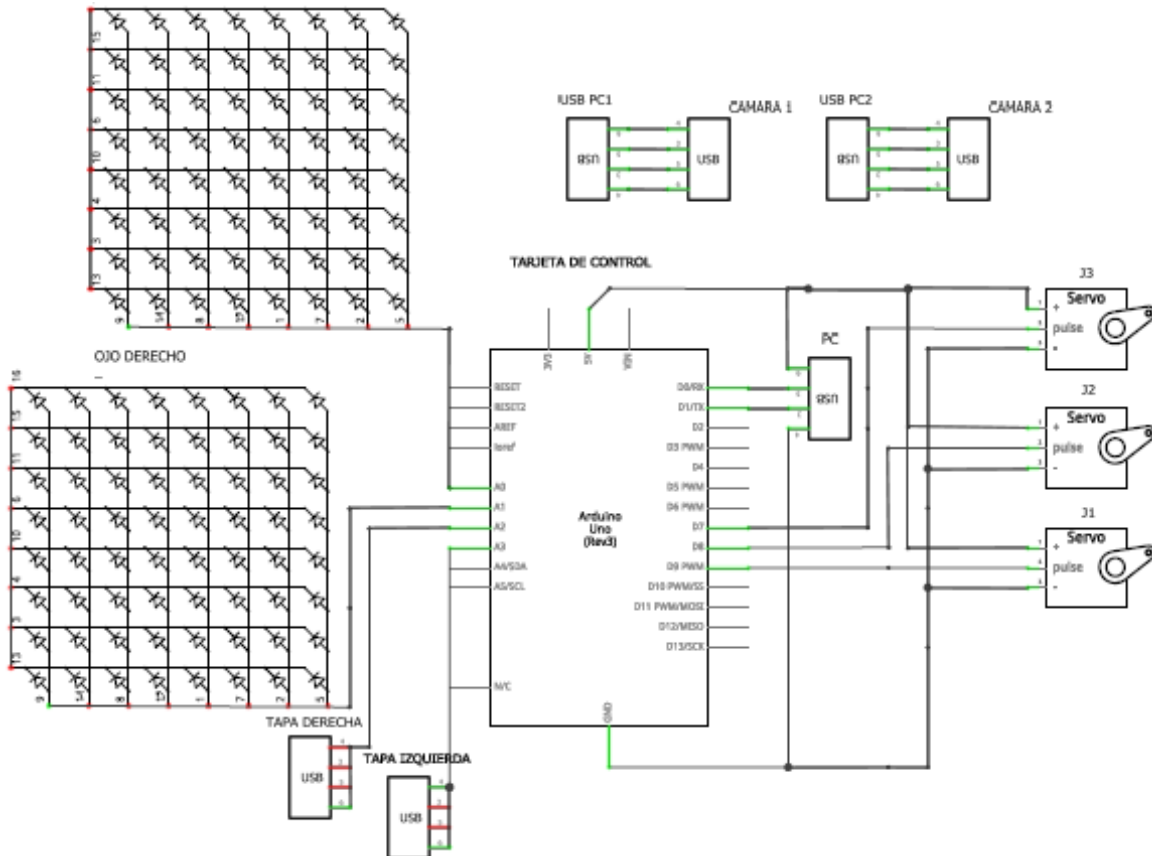


Figura 58 Esquema de conexión de la tarjeta de control.

4.3.2.3 Instalación y calibración de las cámaras

Para la instalación de las cámaras (ver Figura 59) se utilizó un soporte fijo, le permitirán que las cámaras se sostengan en la carcasa de la cabeza del robot.

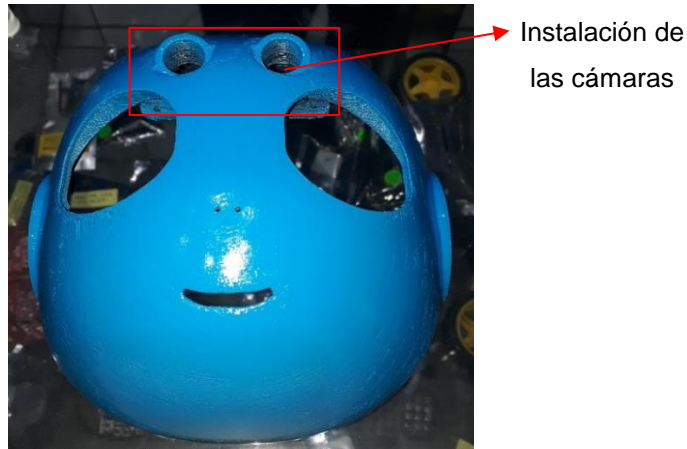


Figura 59 Instalación de las cámaras.

Posteriormente una vez finalizada la instalación se realiza la calibración de las cámaras. Debido a que las líneas rectas en el mundo real deben ser rectas en las imágenes y las imágenes deben estar alineadas entre sí.

Las cámaras se calibran individualmente, para ello se utiliza el software OpenCV. Para la calibración de las cámaras se debe obtener algunos datos y se utiliza un tablero de ajedrez (ver Figura 61), se debe tomar en cuenta la cantidad de esquinas visibles. En la Figura 60 se muestra las líneas de código a utilizar para de calibración de cada una de las cámaras (Albert Armea Powered by Hugo with theme Minos, 2018).

```
# Different directories for each camera
LEFT_PATH = "capture/left/{:06d}.jpg"
RIGHT_PATH = "capture/right/{:06d}.jpg"
# Filenames are just an increasing number
frameId = 0
# Capture loop from earlier...
while(True):
    # Actually save the frames
    cv2.imwrite(LEFT_PATH.format(frameId), leftFrame)
    cv2.imwrite(RIGHT_PATH.format(frameId), rightFrame)
    frameId += 1
```

Figura 60 Líneas de código para la calibración de las cámaras.

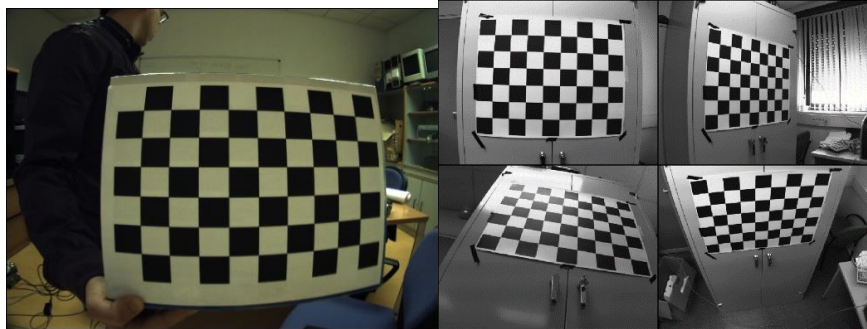


Figura 61 Tablero de ajedrez para calibración de cámaras.

Antes de ejecutar el algoritmo de calibración, se debe actualizar CHESSBOARD_SIZE para que coincida con la geometría de las esquinas de su tablero de ajedrez. Se recomienda fue tomar varias muestras aleatorias como 64 imágenes esto es debido a que el proceso después de que había estado calibrando durante aproximadamente una hora. (ver Figura 62)

```
MAX_IMAGES = 64
if (len(filenamees) > MAX_IMAGES):
    print("Too many images to calibrate, using {0} randomly selected images"
          .format(MAX_IMAGES))
    filenamees = random.sample(filenamees, MAX_IMAGES)
```

Figura 62 Obtención de muestras aleatorias.

Después de esta calibración se tiene distorsión en la imagen se debe realizar recortes de la imagen 4:3 o 960 x 720 usando el corte de matrices (Ver Figura 63).

```
CROP_WIDTH = 960
def cropHorizontal(image):
    return image[:,
                 int((CAMERA_WIDTH-CROP_WIDTH)/2):
                 int(CROP_WIDTH+(CAMERA_WIDTH-CROP_WIDTH)/2)]
```

Figura 63 Obtención de muestras aleatorias.

Las coordenadas reales de los objetos detectados se pueden determinar a partir de las matrices obtenidas en la calibración de las cámaras. En la Figura 64 se muestra la

calibración de las cámaras izquierda y derecha que se utilizara para sistema de visión artificial.



Figura 64 Coordenadas en pixeles y reales del objeto.

4.3.2.2 Instalación de matrices led

En la Figura 65 se muestra la instalación de las matrices led para realizar las expresiones del robot que permitirán realizar expresiones, las matrices led permiten hacer al robot amigable para los usuarios.

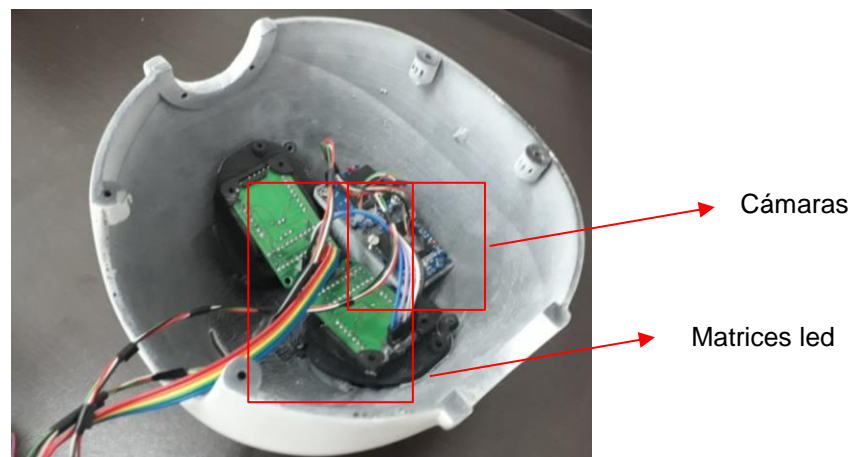


Figura 65 Instalación de las matrices led y cámaras.

4.4 Pruebas y resultados

Se desarrolla diversas pruebas para encontrar el adecuado funcionamiento de cada una de las técnicas de visión artificial de tal manera que se cree un diseño robusto que cumpla con los requerimientos del usuario. El protocolo de pruebas se desarrolla en 5 etapas. En la primera etapa se realizan pruebas de iluminación del rostro, en la segunda etapa se realizan pruebas de reconocimiento de rostros, en la tercera etapa se realiza las pruebas de reconocimiento de expresiones faciales, en la cuarta etapa se realiza pruebas de detección y seguimiento de objetos y finalmente en la quinta etapa se procede a verificar el funcionamiento en la generación del mapa de disparidad y distancia de un objeto para cumplir con los objetivos planteados.

4.4.1 Desarrollo del protocolo de pruebas

El protocolo de pruebas utilizado se realizó basado en la norma ISO/IEC 19794-5:2005 que presenta un formato de los datos para sistemas biométricos basados en imágenes del rostro, el mismo que se realizó en varias etapas que se detallan a continuación:

- **ETAPA 1:** Pruebas de iluminación de rostros

En la primera etapa se realiza un tratamiento de la iluminación (ver Tabla 36) ya que uno de los problemas más importantes para algunos algoritmos de visión artificial es la iluminación (Bronte, 2008).

Tabla 36*Protocolo de pruebas de iluminación de rostros*

Prueba Etapa 1	
Identificación de la prueba	Iluminación
Tipo de prueba	Prueba de iluminación de rostros
Componente sometido a prueba	Entorno
Lugar y Fecha de elaboración	Quito 01 de agosto de 2018
Responsables	Cristian Ochoa Freddy Trávez
Objetivo general de la prueba	Realizar el análisis del reconocimiento facial con variación de las condiciones de iluminación en sistemas abiertos y cerrados a fin de determinar cuál cumple con un correcto funcionamiento.
Duración estimada	2 horas aproximadamente
Participantes	
Cristian Ochoa	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Freddy Trávez	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Descripción de la prueba	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Capturar las imágenes variando la distancia de la posición de la persona. 2. Capturar las imágenes variando los planos de captura considerando los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - Frontal - Lateral derecho - Lateral izquierdo 3. Registrar los datos obtenidos. 	

- **ETAPA 2:** Pruebas de identificación de personas

En la segunda etapa se realiza la identificación de personas considerando usuarios registrados en la base de datos, así como también usuarios que no estén en la base de datos para verificar el funcionamiento del sistema (ver Tabla 37).

Tabla 37*Protocolo de pruebas de identificación de personas*

Prueba Etapa 2	
Identificación de la prueba	Identificación de personas
Tipo de prueba	Prueba de identificación de personas
Componente sometido a prueba	Imagen
Lugar y Fecha de elaboración	Quito 01 de agosto de 2018
Responsables	Cristian Ochoa Freddy Trávez
Objetivo general de la prueba	Realizar la identificación de diversos usuarios a fin de determinar la fiabilidad en el funcionamiento del sistema.
Duración estimada	1 hora aproximadamente
Participantes	
Cristian Ochoa	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Freddy Trávez	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Descripción de la prueba	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Capturar las imágenes de usuarios registrados en la base de datos. 2. Capturar las imágenes de usuarios no registrados en la base de datos. 3. Registrar los datos obtenidos. 	

- **ETAPA 3:** Pruebas de reconocimiento de expresiones faciales

En la tercera etapa se realiza el reconocimiento de expresiones faciales como: alegría, tristeza, ira y sorpresa. A continuación, en la Tabla 38 se muestra el protocolo desarrollado.

Tabla 38*Protocolo de pruebas de reconocimiento de expresiones faciales*

Prueba Etapa 3	
Identificación de la prueba	Reconocimiento expresiones faciales
Tipo de prueba	Prueba de reconocimiento expresiones faciales
Componente sometido a prueba	Imagen
Lugar y Fecha de elaboración	Quito 01 de agosto de 2018
Responsables	Cristian Ochoa Freddy Trávez
Objetivo general de la prueba	Realizar el reconocimiento de diferentes expresiones faciales a fin de determinar el porcentaje de coincidencia de la imagen con la base de datos.
Duración estimada	1 hora aproximadamente
Participantes	
Cristian Ochoa	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Freddy Trávez	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Descripción de la prueba	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Capturar las imágenes a fin de identificar el rostro. 2. Extraer las características de la imagen. 3. Comparar la imagen con la base de datos. 4. Mostrar la expresión de mayor coincidencia. 5. Registrar los datos obtenidos. 	

- **ETAPA 4:** Pruebas de detección y seguimiento de objetos

En la cuarta etapa se realiza la detección y seguimiento de diferentes objetos de diferentes colores como: verde, rojo, azul y amarillo. A continuación, en la Tabla 39 se muestra el protocolo desarrollado.

Tabla 39*Protocolo de pruebas de detección y seguimiento de objetos*

Prueba Etapa 4	
Identificación de la prueba	Detección y seguimiento de objetos
Tipo de prueba	Prueba de detección y seguimiento de objetos
Componente sometido a prueba	Imagen
Lugar y Fecha de elaboración	Quito 01 de agosto de 2018
Responsables	Cristian Ochoa Freddy Trávez
Objetivo general de la prueba	Realizar la detección y seguimiento de diferentes objetos a fin de determinar la fiabilidad en el funcionamiento del sistema.
Duración estimada	1 hora aproximadamente
Participantes	
Cristian Ochoa	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Freddy Trávez	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Descripción de la prueba	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Detectar el color y el área del objeto. 2. Ubicar el centroide. 3. Comparar con el centro del foco de la cámara. 4. Verificar el seguimiento del objeto para diferentes distancias con relación a la posición de las cámaras. 5. Registrar los resultados obtenidos. 	

- **ETAPA 5:** Pruebas de generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto

En la quinta etapa se realiza la generación del mapa de disparidad y la distancia de un objeto. A continuación, en la Tabla 40 se muestra el protocolo desarrollado.

Tabla 40*Protocolo de pruebas de generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto*

Prueba Etapa 5	
Identificación de la prueba	Generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto.
Tipo de prueba	Prueba de generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto.
Componente sometido a prueba	Imagen
Lugar y Fecha de elaboración	Quito 01 de agosto de 2018
Responsables	Cristian Ochoa Freddy Trávez
Objetivo general de la prueba	Realizar la generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto a fin de realizar una reconstrucción del entorno y verificar el funcionamiento del sistema.
Duración estimada	1 hora aproximadamente
Participantes	
Cristian Ochoa	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Freddy Trávez	Estudiante Ingeniería Mecatrónica – ESPE
Descripción de la prueba	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtener el par de imágenes. 2. Pre-procesar la imagen 3. Obtener el mapa de disparidad de la imagen 4. Registrar los resultados obtenidos. 	

4.4.2 Pruebas de iluminación en identificación de personas

En esta sección se realizó pruebas de pruebas de iluminación, tomando en consideración dos posibles casos que es una iluminación controlada y una no controlada.

- La primera prueba se realizó en un entorno con iluminación controlada con luces fluorescentes, es decir, la iluminación sobre la cara es aproximadamente uniforme con un fondo regular.
- La segunda prueba se realizó en un entorno con iluminación no controlada es decir en el exterior donde las condiciones ambientales varían de una manera impredecible.

4.4.2.1 Prueba de identificación de personas en condiciones de iluminación controlada

La prueba para condiciones de iluminación se realizó al variar dos parámetros la distancia y la posición de la imagen en los planos: frontal, lateral derecho y lateral izquierdo, para la prueba se utilizaron 5 usuarios.

En la Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43 y Tabla 44 se muestra los valores de las condiciones para cada uno de los usuarios. Donde la puntuación de 1 es para buen funcionamiento y 0 es para un mal funcionamiento

Tabla 41

Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 1.

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo	Total
80	1	1	1	99.90%
134	1	1	1	99.90%
188	1	1	0	66.60%
242	1	0	1	66.60%
296	1	0	0	33.30%
350	0	0	0	0.00%
Total	83.33%	49.99%	49.99%	

Tabla 42

Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 2.

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo	Total
80	1	1	1	99.90%
134	1	1	1	99.90%
188	1	1	0	66.60%
242	1	0	1	66.60%
296	1	0	0	33.30%
350	0	0	0	0.00%
Total	83.33%	49.99%	49.99%	

Tabla 43*Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 3.*

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo	Total
80	1	1	1	99.90%
134	1	1	1	99.90%
188	1	1	1	99.90%
242	1	1	1	99.90%
296	1	0	0	33.30%
350	0	0	0	0.00%
Total	83.33%	66.66%	66.66%	

Tabla 44*Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 4.*

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo	Total
80	1	1	1	99.90%
134	1	1	1	99.90%
188	1	0	1	66.60%
242	1	1	0	66.60%
296	1	0	0	33.30%
350	0	0	0	0.00%
Total	83.33%	49.99%	49.99%	

Tabla 45*Pruebas en condiciones de iluminación controladas en el usuario 5.*

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo	Total
80	1	1	1	99.90%
134	1	1	1	99.90%
188	1	1	1	99.90%
242	1	1	0	66.60%
296	0	0	0	0.00%
350	0	0	0	0.00%
Total	66.66%	66.66%	49.99%	

En la Tabla 46 se muestra un resumen de los datos obtenidos para evaluar el reconocimiento de rostros de acuerdo con la variación de la distancia en espacios con condiciones de iluminación controladas.

Tabla 46

Pruebas de la distancia de los usuarios.

Usuarios	80 [cm]	134 [cm]	188 [cm]	242 [cm]	296 [cm]	350 [cm]
Usuario 1	99.90%	99.90%	66.60%	66.60%	33.30%	0.00%
Usuario 2	99.90%	99.90%	66.60%	66.60%	33.30%	0.00%
Usuario 3	99.90%	99.90%	99.90%	99.90%	33.30%	0.00%
Usuario 4	99.90%	99.90%	66.60%	66.60%	33.30%	0.00%
Usuario 5	99.90%	99.90%	99.90%	66.60%	0%	0.00%
Total	99.90%	99.90%	79.92%	73.26%	26.64%	0.00%

En la Tabla 47 se muestra un resumen de los datos obtenidos en las posiciones frontal, lateral derecho e izquierdo, para evaluar el reconocimiento de rostros de acuerdo con la modificación del rostro.

Tabla 47

Pruebas de posición de los usuarios.

Usuarios	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo
Usuario 1	83.33%	49.99%	49.99%
Usuario 2	83.33%	49.99%	49.99%
Usuario 3	83.33%	66.66%	66.66%
Usuario 4	83.33%	49.99%	49.99%
Usuario 5	66.66%	66.66%	49.99%
Total	80.00%	56.66%	53.32%

En la Tabla 48 se muestra los datos obtenidos en la relación entre la distancia y el plano más conveniente para que se ejecute el reconocimiento facial de manera óptima.

Tabla 48

Posición usuarios entre la distancia y el plano.

Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Lateral Izquierdo
80	100.00%	100.00%	100.00%
134	100.00%	100.00%	100.00%
188	100.00%	80.00%	60.00%
242	100.00%	60.00%	60.00%
296	80.00%	0.00%	0.00%
350	0.00%	0.00%	0.00%
Total	80.00%	56.67%	53.33%

4.4.2.2 Resultados de las pruebas de identificación de personas

Previamente antes de realizar el reconocimiento de rostros, el usuario debe estar registrado, es decir debe estar en la base de datos para realizar el reconocimiento de rostros, dicha base de datos almacenara 15 imágenes del rostro del usuario en diferentes perspectivas. Para poder comprobar el funcionamiento del algoritmo se reconocimiento de rostros se realizaron pruebas con distintos grados de iluminación, con más de un usuario y con tomas del rostro con posturas diferente.

En la Figura 66 y Figura 67 se muestra la prueba de reconocimiento de rostros con una iluminación de 0% y 100% respectivamente. En la Figura 68 se muestra el reconocimiento de rostros con varios usuarios.



Figura 66 Reconocimiento de rostros - Iluminación al 100%.



Figura 67 Reconocimiento de rostros – Iluminación al 0%



Figura 68 Reconocimiento de rostros varios usuarios

4.4.3 Pruebas del Reconocimiento de expresiones faciales

En la Figura 70 se muestra las diferentes pruebas para el reconocimiento de las expresiones alegría, tristeza y sorpresa, mediante la implementación de algoritmo visión enfocado en las expresiones del ser humano.

Antes de ejecutar la prueba del algoritmo se realiza el entrenamiento de las expresiones se considera una base de datos de 100 imágenes por cada expresión para

el entrenamiento, haciendo uso de la herramienta tensorflow en dicho procedimiento. En la Figura 69 se muestra el entrenamiento para generar la base de datos.

```
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.058072: Step 5510: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.058424: Step 5510: Cross entropy = 0.000587
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.113659: Step 5510: Validation accuracy = 73.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.654791: Step 5520: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.655107: Step 5520: Cross entropy = 0.000665
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:19.713329: Step 5520: Validation accuracy = 79.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.273181: Step 5530: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.273491: Step 5530: Cross entropy = 0.000629
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.332288: Step 5530: Validation accuracy = 57.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.892940: Step 5540: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.893164: Step 5540: Cross entropy = 0.000730
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:20.947708: Step 5540: Validation accuracy = 67.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:21.436826: Step 5550: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:21.437016: Step 5550: Cross entropy = 0.000735
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:21.482341: Step 5550: Validation accuracy = 70.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:21.981058: Step 5560: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:21.981267: Step 5560: Cross entropy = 0.000650
INFO:tensorflow:2018-08-06 00:50:22.027197: Step 5560: Validation accuracy = 69.0% (N=100)
```

Figura 69 Entrenamiento con tensorflow

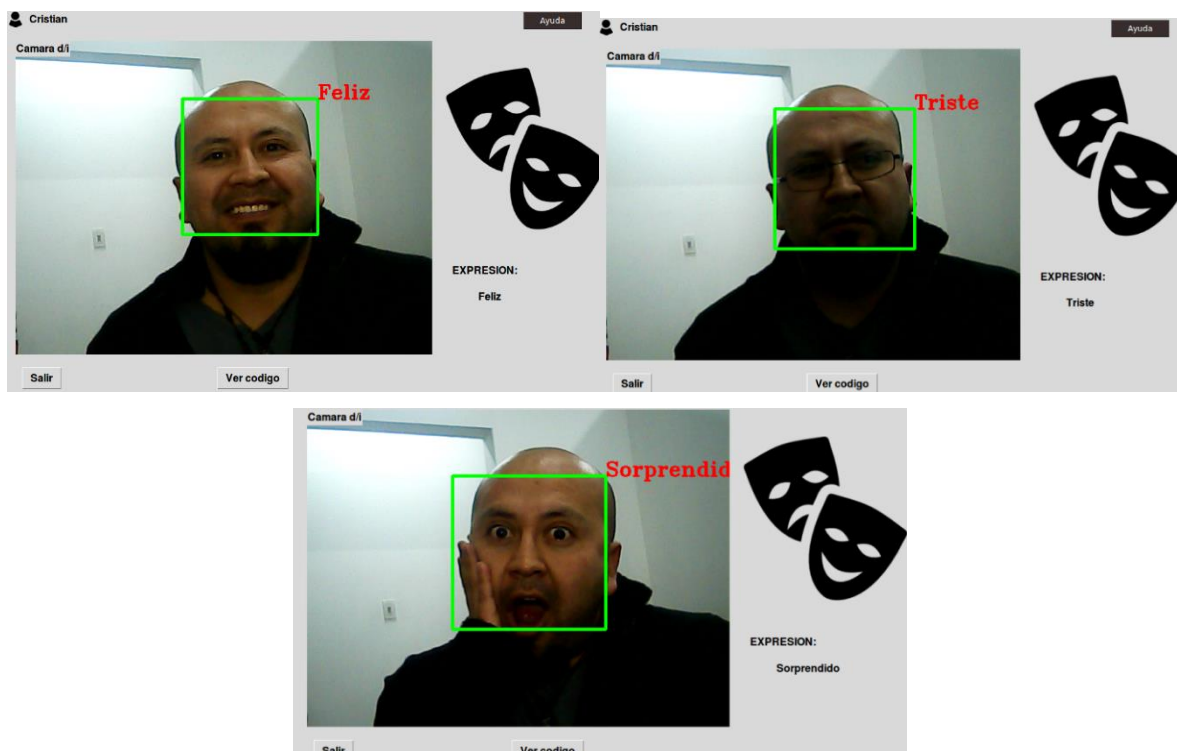


Figura 70 Prueba de reconocimiento de expresiones.

4.4.4 Pruebas de Detección y seguimiento de objetos

En la Figura 71 se muestra la prueba de detección de objetos de diferentes colores como: verde, rojo, azul y amarillo.

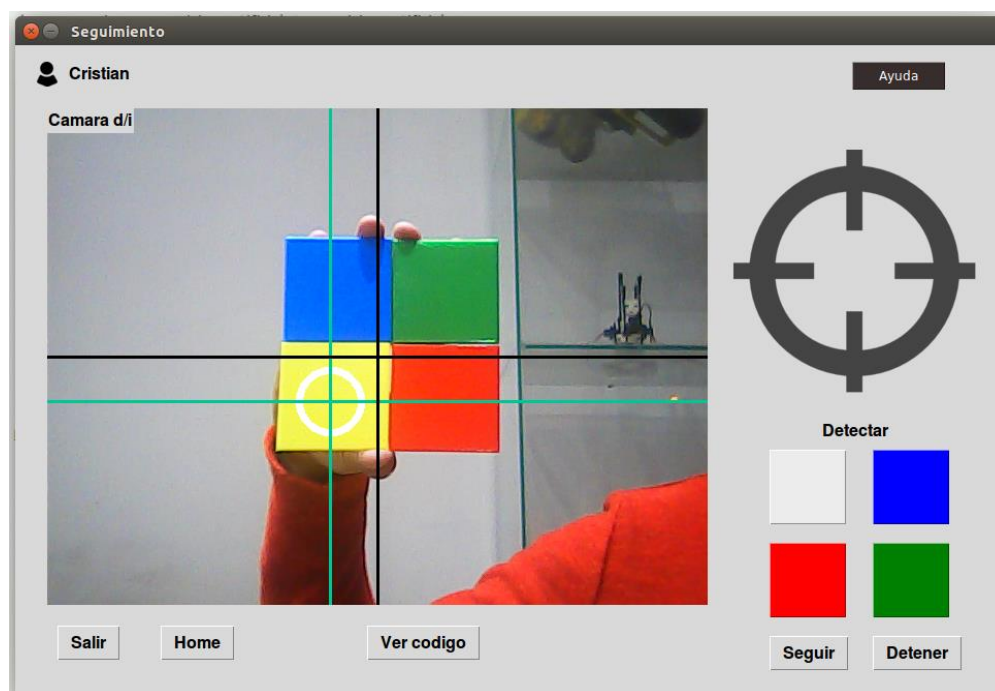


Figura 71 Detección de objetos por color

En las Tabla 49, Tabla 50, Tabla 51 y Tabla 52 se presentan los resultados obtenidos en el seguimiento y detección de objetos de diferentes colores en el rango de distancia comprendido entre 80 cm y 350 cm. Donde la puntuación de 1 es para buen funcionamiento y 0 es para un mal funcionamiento.

Tabla 49

Detección y seguimiento de objetos de color verde.

	Distancia [cm]	Detección	Seguimiento	Total
Objeto verde	80	1	1	100%
	134	1	1	100%
	188	1	1	100%
	242	1	0	50%
	296	1	0	50%
	350	0	0	0%
Total		83.33%	49.99%	

Tabla 50*Detección y seguimiento de objetos de color rojo.*

	Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Total
Objeto color rojo	80	1	1	100%
	134	1	1	100%
	188	1	1	100%
	242	1	0	50%
	296	1	0	50%
	350	0	0	0%
Total		83.33%	49.99%	

Tabla 51*Detección y seguimiento de objetos de color rojo.*

	Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Total
Objeto color azul	80	1	1	100%
	134	1	1	100%
	188	1	1	100%
	242	1	1	100%
	296	1	0	50%
	350	0	0	0%
Total		83.33%	66.66%	

Tabla 52*Detección y seguimiento de objetos de color amarillo.*

	Distancia [cm]	Frontal	Lateral Derecho	Total
Objeto color amarillo	80	1	1	100%
	134	1	1	100%
	188	1	0	50%
	242	1	1	100%
	296	1	0	50%
	350	0	0	0%
Total		83.33%	49.99%	

En la Tabla 53 se muestra el resume de los datos obtenidos para la detección y seguimiento de acuerdo con la variación del color del objeto, obteniendo un 83.33% de eficiencia para la detección y un 54.16% para el seguimiento.

Tabla 53

Resumen sobre la detección y seguimiento de objetos

Objetos	Detección	Seguimiento
Verde	83.33%	49.99%
Rojo	83.33%	49.99%
Azul	83.33%	66.66%
Amarillo	83.33%	49.99%
Total	83.33%	54.16%

4.4.5 Pruebas de Generación de mapa de disparidad y distancia de un objeto

En la Figura 72 y Figura 73 se muestra la prueba de disparidad y la prueba de distancia de objetos respectivamente. El algoritmo de visión artificial implementado para la generación de mapa de disparidad muestra una escala de grises en varios planos de la imagen permitiendo la reconstrucción 3D de su entorno.



Figura 72 Prueba de disparidad.



Figura 73 Distancia de objetos.

En la Tabla 54 se presenta los errores de medición al medir la distancia de un objeto, se puede observar que los errores oscilan entre el 2.5% y el 80%.

Tabla 54

Errores en la medición de objetos

Medida	Calculada	Error
5	1	80.0%
10	11	10.0%
20	21	5.0%
40	39	2.5%
80	82	2.5%
120	125	4.2%
160	145	9.4%
200	163	18.5%

En la Tabla 55 se muestra el análisis de mapa de disparidad, donde el valor de 1 indica que es color blanco, 0.5 para color gris y 0 para color negro.

Tabla 55*Análisis de mapa de disparidad.*

Distancia [cm]	Test Visual
40	1
80	1
120	0.5
160	0.5
200	0.5
240	0
280	0

4.5 Resumen

El robot consta de diferentes piezas las cuales se presentaron en la sección tres, las mismas fueron impresas mediante una impresora en 3D.

Una vez finalizada las impresiones se realiza el ensamblaje del robot empezando por la estructura interna. En la estructura externa o carcasa se realiza un proceso de mancillado, lijado y posteriormente pintado, y finalmente se realiza el ensamblaje de la carcasa.

Se realiza la instalación de los dispositivos electrónicos como las cámaras, los matrices leds con la tarjeta de control, y la instalación de los servomotores.

Se realizaron diferentes pruebas para verificar el funcionamiento de la plataforma robótica implementada y los algoritmos desarrollados. Las siguientes pruebas realizadas son:

El reconocimiento facial con iluminación controlada y no controlada iluminación u externa, obteniendo mejores resultados con iluminación controlada.

El reconocimiento de expresiones faciales obteniendo un alto porcentaje de fiabilidad para distancias en un rango de trabajo del robot.

Detección y seguimiento de un objeto, para lo cual se utilizaron diferentes objetos con distintos colores, obteniendo un alto índice de detección como muestran los resultados en cada una de las pruebas.

Pruebas de visión estereoscópica, enfocándonos en la obtención del mapa de disparidad la cual muestra una escala de grises en varios planos de la imagen permitiendo la reconstrucción 3D de su entorno.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

- Se diseño y construyo una plataforma robótica que cuenta con un mecanismo de tres grados de libertad y un sistema de visión estereoscópica. Además, se implementó técnicas de visión artificial para identificación de personas, reconocimiento de expresiones faciales, detección y seguimiento de objetos y un algoritmo de visión artificial estéreo que consigue estimar la posición de un objeto en el espacio a través de la generación del mapa de disparidad, facilitando al usuario el aprendizaje y desarrollo del software de robots interactivos.
- Se diseño e implementó una plataforma robótica que utiliza un mecanismo de barras paralelas de tres grados de libertad tipo rotula usando como actuadores servomotores. El mecanismo permite al robot realizar su movimiento de forma natural al interactuar con el usuario.
- Se implementó un sistema de visión artificial pasivo que cuenta con dos cámaras web y un ordenador que facilita la realización de tareas de identificación de personas con el método LFA, reconocimiento de expresiones con el método de integrales proyectivas y detección y seguimiento de objetos con el método de segmentación orientad a regiones.
- Se desarrollo un algoritmo de visión artificial estereoscópica mediante la implementación del método corte de grafos de Kolmogorov y Zabih-GC para determinar el mapa de disparidad en tiempo real y el método de triangulación para calcular la distancia del objeto a la plataforma en un rango de 20 a 80 cm con un error menor al 5%.
- Mediante el desarrollo de un protocolo de pruebas basado en la norma ISO/IEC 19794-5:2005 donde un grupo de 10 usuarios hicieron uso de la plataforma para

la obtención de datos del funcionamiento e interacción del sistema con su entorno, obteniendo un factor de desempeño del 91% para la técnica del identificación de personas, 70% para el reconocimiento de expresiones faciales, 97% para la detección y seguimiento de objetos y del 93% para la estimación de distancia de un objeto a la plataforma del sistema trabajando en un entorno donde la iluminación no es controlada.

5.2 Recomendaciones

- Actualmente las cámaras que se utilizan en el robot cuentan con una resolución de 480x640 pixeles, pero en sistemas similares se utilizan cámaras con resoluciones de hasta 960x1280 se recomienda utilizar estas cámaras con el fin de adquirir imágenes que ayuden a mejorar los resultados de las técnicas de visión estereoscópica.
- La robustez del sistema de visión artificial puede ser mejorada añadiendo una etapa de iluminación para evitar ruidos al momento de adquirir imágenes en el proceso.
- Todas las técnicas cuentan con una etapa de procesamiento de imagen, es posible desarrollar uno o más algoritmos que simplifique la información que ingresa a la etapa de procesado y de esta forma se obtendrá mejores resultados consumiendo menos recursos del ordenador.
- La plataforma requiere de un ordenador externo para poder trabajar, en la actualidad se dispone de mini ordenadores que cuentan con los recursos necesarios para el procesamiento de imágenes y que físicamente pueden ser incorporados dentro del robot.

5.3 Trabajos Futuros

Como trabajo futuro se plantea el implementar un sistema de reconocimiento de rostros usando visión estéreo mediante la extracción de características 3D de los rostros para incrementar la confiabilidad de los sistemas de identificación de personas tradicionales. Al igual que desarrollar un sistema de reconocimiento de voz el cual puede identificar tanto al usuario como sus emociones para mejorar el grado de interacción hombre máquina.

BIBLIOGRAFÍA

(10 de Enero de 2018). Obtenido de <https://opencv.org/>

Agravante, G., Spindler, F., & Chaumette, F. (2017). Visual Servoing in an Optimization Framework for. *IEEE*, 1-8.

Albert Armea Powered by Hugo with theme Minos. (2018). <https://albertarmea.com>. Obtenido de <https://albertarmea.com/post/opencv-stereo-camera/>

Alvarado Moya, P. (Diciembre de 2013). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=QxhOrQ8TmL4>

Aráujo, P., Miranda, R., Carmo, D., Alves, R., & Oliveira, L. (2017). Air-SSLAM: A Visual Stereo Indoor SLAM for Aerial Quadrotors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14.

Arellano, R., & Llumipanta, P. (2014). *Diseño y Construcción de una máquina perforadora de suelo para anclajes de diámetro 32x12000 mm de largo para la estabilización de taludes*. Quito.

Bevill, R., & Park, C. (2016). Interactive Robotic Framework for Multi-sensory Therapy for Children with Autism Spectrum Disorder. *National Robotics Initiative*, 1-2.

Bobick, I. (1999). Large occlusion stereo. *International Journal of Computer Vision*, 181-200.

Bronte, S. (2008). *Sistema de detección y reconocimiento facial de conductores mediante sistemas de visión computacional*. Alcalá: Universidad de Alcalá.

Budynas, R., & Keith, N. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGrawHill.

- Burgard, W., Cremers, A., Fox, D., Hahnel, D., Lakemeyer, G., Schulz, D., . . . Thrun, S. (1998). The Interactive Museum Tour-Guide Robot. *American Association for Artificial Intelligence*, 1-8.
- Cabibihan, Zhang, Li, Meng, Safizadeh, & Yang. (2011). Design and Development of Nancy, a Social Robot. *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, 2.
- Cárdenas, E., Morales, L., & Ussa, A. (2015). La estereoscopia, métodos, aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. *Revista Científica General José María Córdova* , 201-219.
- Compañ, P. (2004). *Estimación de la disparidad en visión estereoscópica. Tratamiento de color*. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial Escuela Politécnica Superior de Alicante.
- Compañía General de Aceros S.A. (s.f.). Recuperado el 02 de Febrero de 2018, de <http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>
- Departamento de Electrónica, U. (2015). *UNICAUCA*. Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/Vision%20de%20Maquina/Documentos/Etapas%20de%20un%20SVA.pdf>
- Domínguez Pavón, S. (2017). *Universidad de Sevilla*. Obtenido de https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/66514/TFG_Sara%20Dom%C3%ADnguez%20Pav%C3%B3n.pdf?sequence=1
- Electrónicos Caldas. (22 de Enero de 2018). *Electrónicos Caldas*. Obtenido de <http://www.electronicoscaldas.com/motores-y-servos/546-servo-motor-mg996r.html>

- Escobar, C. (Noviembre de 2004). *Escuela Nacional de Deporte*. Cali. Obtenido de <http://www.efisioterapia.net/articulos/analisis-comparativo-la-cinematica-hombre-y-la-mujer>
- Escobar, D. (2016). *Universidad de Cundinamarca*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/jegcgarcas/raspberry-jam-bogota-2016-sistema-de-visin-artificial-aplicados-a-procesos-agro-industriales-mediante-ordenadores-de-placa-reducida-raspberry-pi>
- Fernández, L., & Sotomayor, L. (noviembre de 2016). Análisis cinemático inverso y directo del robot paralelo. Quito, Pichincha. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16868/1/CD-7447.pdf>
- Ferrustronic. (15 de Enero de 2017). *USC_ISI*. Obtenido de <https://www.isi.edu/robots/index.html>
- Ficalora, J. P., & Cohen, L. (2009). *Quality Function DEployment and SIX SIGMA, A QFD Handbook*. Indiana: Prentice HALL.
- Fraunhofer IPA. (2016). *Care-O-bot 4*. Obtenido de <http://www.care-o-bot-4.de/>
- García Cortés, D. C. (Noviembre de 2014). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/46239/1/300497.2014.pdf>
- García, A. (2015). Obtenido de <http://www.abelgarcia.mx/robotica-social>
- García, Y. (17 de abril de 2017). Obtenido de <http://pontegeekpty.com/reconocimiento-facial-del-fbi-la-mira/>
- Gente. (21 de Julio de 2014). *En Cuenca crean a Sam, un robot muy doméstico*. Obtenido de El Universo: <http://www.eluniverso.com/vida-estilo/2014/07/21/nota/3262096/cuenca-crean-sam-robot-muy-domestico>

González Aguilera, D. (2014). *Universidad de Salamanca*. Obtenido de <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/procesamiento-avanzado-de-imagenes-digitales/contenidos/Tema3.pdf>

Guerrero, J., Pajares, G., & Guijarro, M. (2015). *Técnicas de Procesamiento de Imágenes Estereoscópicas*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Hernández, I. R. (2007). *Gelbukh*. Obtenido de Gelbukh: http://www.gelbukh.com/polibits/2007_35/La%20Vision%20Artificial%20en%20la%20Robotica.pdf

Ingeniería mecánica. (20 de Enero de 2018). Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>

kickstarter. (2017). Obtenido de <https://www.kickstarter.com/projects/391398742/maki-a-3d-printable-humanoid-robot?lang=es>

Labview. (10 de Enero de 2018). Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>

Lecumberry, F. (2014). Cálculo de disparidad en imágenes estéreo, una comparación. *Workshop de Computación Gráfica, Imágenes y Visualización*, 12.

Legua, C. (2013). Seguimiento automático de objetos en sistemas con múltiples cámaras. Madrid: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID.

MEGATENDENCIAS. (13 de 12 de 2008). Obtenido de http://www.tendencias21.net/Robots-sociales-la-nueva-generacion_a2833.html

Mejía, M., & Nuñez, J. (2016). *“Diseño y construcción de un robot social para interacción hombre máquina”*. Sangoqui: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Monsó, J. (2001). *Sistemas de identificación y Control automáticos*. Barcelona: Marcombo S.A.

- Montalvo, M. (2010). *Técnicas de visión estereoscópica para determinar la estructura tridimensional de la escena*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Moreno Díaz, A. B. (15 de 06 de 2004). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <http://oa.upm.es/625/1/10200408.pdf>
- Moriello, S. (2005). *Inteligencia Natural y Sintética*. Buenos Aires: Nueva Librería.
- Noldus Information Technology. (2017). *Noldus*. Obtenido de <http://www.noldus.com/human-behavior-research/products/facereader>
- Norskov, M. (2016). *Social Robots: Boundaries, potencial, challenges*. New York: Routledge.
- Nuñez, P., Bustos, P., García, I., & Jaramillo, E. (2011). Robots Sociales para la Mejora de la Calidad de Vida de las Personas Dependientes. *IBERDISCAP 2011*.
- OpenCV. (20 de Enero de 2018). Obtenido de <https://opencv.org/>
- Pastor, E. (2012). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de http://oa.upm.es/13870/3/PFC_EDUARDO_MARTIN_PASTOR.pdf
- Peña, A. (2010). *Módulo de visión artificial del robot humanoide HOAP3. Aplicación al seguimiento de objetos móviles*. Madrid: Universidad Carlos III Madrid.
- Pérez González, C. (Septiembre de 2016). *Centro de electrónica Industrial- Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de http://oa.upm.es/43161/1/TFG_CARLOS_PEREZ_GONZALEZ.pdf
- PIMI15-04, & Zambrano, O. (2015). *Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación*.

Pinto, F. (2015). Análisis de la aplicación de algoritmos de K-means y Continuous Max-Flow a la segmentación de imágenes en color. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*, 18.

Processing. (10 de Enero de 2018). Obtenido de <https://processing.org>

PyGTK. (20 de Enero de 2018). Obtenido de <http://www.pygtk.org/>

Ramirez, J., & Rubio, A. (2012). Modelamiento Matemático de la Cinemática Directa e Inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad. *Journal of Materials Processing Technology*, 7.

Rod, F. (2014). *Montaje y Puesta en Marcha de Sistemas Robóticos y sistemas de visión*. Mexico: IC Editorial.

Rodríguez Acevedo, J. (2012). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11916/1/JulianRodriguezacevedo.2013.pdf>

Rubio, J. (2016). *“Diseño y construcción de un robot interactivo para el trastorno del espectro autista (TEA)”*. Sangolqui: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Ryo, S., & Lee, J. (2016). *Robot-play Therapy for Improving Prosocial Behaviours in*. Kasugai: Universidad Chubu.

SoftBank. (11 de Julio de 2014). *SoftBank Robotics*. Obtenido de <https://www.ald.softbankrobotics.com/en/cool-robots/pepper>

SONY Corporation. (2017). Obtenido de <http://www.sony-aibo.com/>

Tarlea, J. (03 de Octubre de 2010). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/jorgetarlea/sistema-de-posicionamiento-de-objetos-mediante-visin-estreo-embarcable-en-vehculos-inteligentes-5347562>

Universidad de Alicante. (2015). Obtenido de https://moodle2015-16.ua.es/moodle/pluginfile.php/105463/mod_page/content/43/5-Reconocimiento%20de%20objetos.pdf

Universidad Politécnica Salesiana. (2014). *Grupo de investigación en Inteligencia Artificial y Tecnologías de Asistencia*. Obtenido de <http://giiata.blog.ups.edu.ec/sam>

Vásquez López, M. Á. (marzo de 2014). Obtenido de <http://biblioteca.cio.mx/tesis/15950.pdf>

Vincent, J., Taipale, S., Sapio, B., & Fortunati, L. (2015). *Social Robots from a Human Perspective*. New York: Springer.