



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: DESARROLLO DE DOS ROBOTS PARA REALIZAR
TRABAJO COOPERATIVO**

**AUTOR: CAMPOVERDE CAMPOVERDE PAULINA
ELIZABETH**

DIRECTOR: Ing. LOZA MATOVELLE DAVID CÉSAR MSc.

SANGOLQUÍ

2017



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DESARROLLO DE DOS ROBOTS PARA REALIZAR TRABAJO COOPERATIVO”***. Realizado por la señorita **PAULINA ELIZABETH CAMPOVERDE CAMPOVERDE**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **PAULINA ELIZABETH CAMPOVERDE CAMPOVERDE** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de marzo del 2017

Ing. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE MSc.

DIRECTOR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **PAULINA ELIZABETH CAMPOVERDE CAMPOVERDE**, con cédula de identidad N° **172558446-8**, declaro que éste trabajo de titulación "**DESARROLLO DE DOS ROBOTS PARA REALIZAR TRABAJO COOPERATIVO**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

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

Sangolquí, 03 de marzo del 2017

CAMPOVERDE CAMPOVERDE PAULINA ELIZABETH

C.C. 172558446-8



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **PAULINA ELIZABETH CAMPOVERDE CAMPOVERDE**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“DESARROLLO DE DOS ROBOTS PARA REALIZAR TRABAJO COOPERATIVO”*** Cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 03 de marzo del 2017

CAMPOVERDE CAMPOVERDE PAULINA ELIZABETH

C.C. 172558446-8

Dedicatoria

Este presente proyecto lo dedico a mi abuelita Cecilia Sánchez, a mi madre Elizabeth Campoverde, a Dios mi padre incondicional y a mi hermano Luis Alfonso Campoverde.

Ellas representan el tesoro más grande que mi vida puede tener, Dios las envió para guiarme y educarme. No tengo como pagar todo lo que han hecho por mí, sin olvidar su amor, incondicionalidad y sin duda cada una de sus enseñanzas.

Mi madre mi mejor amiga, la que jamás me ha abandonado a pesar de los problemas y momentos difíciles, su apoyo el más importante para culminar esta etapa de mi vida, y el inicio de muchas más, para alcanzar cada uno de mis sueños.

Mi abuela que me guía desde el cielo y la llevo en mi corazón, me quedó con todos sus recuerdos, su fortaleza y con esa gran mujer, imparabile, luchadora, tenaz, que nunca dejo que los problemas la agobien, sino que siempre vio como oportunidades cada uno de ellos. Sin olvidar su mirada, sus bellos ojos, su sonrisa y su frase preferida "mi negrita". Sé que no puedes estar presente para ver que todos tus sacrificios valieron la pena, para cumplir el sueño de toda una vida.

Pauli.

Agradecimiento

A mi ingeniero mecánico preferido, Oscar Meléndez: por tu amor, tu amistad, cada uno de tus consejos, por no dejarme sola cuando más he necesitado, por amarme con mis virtudes, defectos y reconocer de que estoy hecha. Por confiar en mí incondicionalmente y siempre llenar de alegría mi vida, espero que Dios me regale la dicha de estar a tu lado muchos años más.

A mi hermano Luis Alfonso, mi ejemplo a seguir por su perseverancia, tenacidad y responsabilidad para cumplir sus objetivos, y sé que Dios te ayudará a cumplir todos los anhelos de tu corazón.

A mis hermanos Michu, Daniel y Cesarín porque su amor y alegría de ver la vida, me ha llenado de fortaleza para seguir en este largo camino. Aunque no estés físicamente y las circunstancias de la vida no nos permitieron estar juntos, sé que desde el cielo estas orgulloso de mi.

A Mary Espín y Mary Pambi por su sabiduría para enseñarme cuanto Dios me ama y las grandes cosas que tiene preparado para mi vida.

A Gissela Guamán mi mejor amiga y sus padres por siempre permitirme ser parte de su familia y abrirme las puertas de su hogar.

A Andrés Villárcres por ser un gran amigo y confidente, brindarme sus consejos y siempre sacarme una sonrisa en momentos difíciles.

A Paulina Cajamarca por enseñarme que en momentos de desesperación es donde uno más debe luchar por alcanzar sus sueños.

A Eduardo Cantos por ser el padre que nunca tuve, por sus enseñanzas, consejos y por creer en mí, en mi potencial para alcanzar el éxito en mi carrera profesional.

A Byron Villárcres, Alejandra Pazmiño, Gabriela Cantuña, Cristian Ochoa y Marco Llaguarima por sus locuras y ocurrencias, por enseñarme que todo sacrificio tiene su recompensa.

A David Toabanda, Paul Loja, Alexander Chicaiza, Luis Pilaguano y Fernando Alvarado por enseñarme que la diferencia entre una persona y otra, no es un título universitario, sino la humildad y la tenacidad para alcanzar los sueños del corazón.

A Nelson Cárdenas “Don Car” y “Don Velita” por siempre brindarme sus palabras de aliento, por ser mis amigos que jamás tuve a lo largo de mi carrera universitaria, y enseñarme que en la vida nada es imposible.

A mi tío Juan Carlos Campoverde por su colaboración enorme para culminar este proyecto. Dios te permitió entender que tu familia jamás te abandonará y cuanto te amamos.

A mi familia por su apoyo y preocupación, porque a pesar de todo siempre confiaron en mi capacidad y talento para alcanzar cada una de mis metas.

A mi director de tesis David Loza por su ayuda y motivación para la culminación del presente proyecto.

Porque hoy es posible que mi vida cambie, me siento feliz que todas estas personas me acompañaron a lo largo de este gran sueño.

Pauli.

"Los grandes sueños son de locos geniales, lo ejecutan los luchadores tenaces, lo disfrutan los felices mortales y lo critican los inútiles."

Anónimo

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESÚMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	6
1.4. ALCANCE.....	7
1.5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	9
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	9
CAPÍTULO 2	11
ESTADO DEL ARTE	11
2.1. ROBÓTICA COLABORATIVA.....	11
2.1.1. <i>Historia de la robótica cooperativa</i>	13

2.1.2. Origen de la robótica cooperativa.....	15
2.1.3. Desarrollo en la actualidad de la robótica cooperativa	16
2.1.4. Clasificación por nivel de comunicación de los sistemas robóticos	18
2.1.4.1. Muy acoplados.....	18
2.1.4.2. Poco acoplados.....	19
2.1.5. Aplicaciones de la Robótica Cooperativa.....	19
2.2. SISTEMA DE CONTROL DE ROBÓTICA COOPERATIVA.....	20
2.2.1. Hardware.....	20
2.2.1.1. Arquitectura Centralizada	20
2.2.1.2. Arquitectura Distribuida.....	22
2.2.2. Control por Software.....	24
2.2.2.1. Agente Software.....	24
2.2.2.2. Sistema Multi-Agente	25
2.2.2.3. Comunicación entre agentes.....	26
2.3. VISIÓN ARTIFICIAL APLICADA A LA DETECCIÓN DE FIGURAS GEOMÉTRICAS.....	27
2.3.1. Generalidades	27
2.3.2. Detección de colores (segmentación).....	28
2.3.2.1. Conversión de escala de colores.....	28
2.3.2.2. Operaciones morfológicas	29
2.3.3. Reconocimiento de contornos	30
2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ROBÓTICA COLABORATIVA.....	33
2.4.1. Ventajas.....	33
2.4.2. Desventajas.....	33
2.5. RESUMEN.....	33
CAPÍTULO 3.....	35
METODOLOGÍA Y DISEÑO	35
3.1. DEFINICIÓN DE NECESIDADES.....	35
3.2. ESPECIFICACIONES DEL CONCEPTO	36
3.3. DEFINICIÓN DEL CONCEPTO	38
3.3.1. Generación de concepto	38
3.3.2. Módulo 1: Estructura mecánica	39

3.3.2.1. Subsistema 1: Tipo de configuración.....	39
3.3.2.2. Subsistema 2: Tipo de accionamiento	43
3.3.3. <i>Módulo 2: Posicionamiento</i>	46
3.3.3.1. Subsistema 1: Ubicación y planeación	46
3.3.4. <i>Módulo 3: Control</i>	47
3.3.4.1. Subsistema 1: Tipo de control	47
3.3.4.2. Subsistema 2: Software de control.....	48
3.4. EVALUACIÓN DE CONCEPTOS	49
3.4.1. <i>Método ordinal corregido de los criterios ponderados</i>	49
3.4.2. <i>Módulo 1: Estructura mecánica</i>	50
3.4.2.1. Subsistema 1: Tipo de configuración.....	50
3.4.2.2. Subsistema 2: Tipo de Accionamiento.....	52
3.4.3. <i>Módulo 2: Posicionamiento</i>	54
3.4.3.1. Subsistema 1: Ubicación y planificación	54
3.4.4. <i>Módulo 3: Control</i>	56
3.4.4.1. Subsistema 1: Tipo de control	56
3.5. SELECCIÓN DE CONCEPTO.....	58
3.6. MÓDULO 1. ESTRUCTURA.....	58
3.6.1. <i>Diseño Mecánico</i>	58
3.6.1.1. Subsistema 1. Tipo de configuración.....	59
3.6.1.2. Subsistema 2. Tipo de accionamiento	60
3.6.1.3. Potencia requerida.....	62
3.6.1.4. Resistencia del material.....	65
3.6.2. <i>Diseño Electrónico</i>	65
3.6.2.1. Selección de elementos electronicos.....	65
3.6.2.2. Selección de la tarjeta de control	67
3.7. MÓDULO 2. POSICIONAMIENTO.....	68
3.7.1. <i>Subsistema 1. Ubicación y planeación</i>	68
3.7.1.1. Cinemática.....	68
3.7.1.2. Restricciones.....	68
3.7.1.3. Esquema de movimiento.....	69
3.7.1.4. Métodos de determinación de posición.....	69

3.8. MÓDULO 3. CONTROL.....	78
3.8.1. <i>Subsistema 1. Tipo de control</i>	78
3.8.1.1. Centralizado.....	78
3.8.2. <i>Subsistema 2. Software de control</i>	78
3.9. RESUMEN.....	80
CAPÍTULO 4.....	82
CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....	82
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT MÓVIL.....	82
4.1.1. <i>Ensamblaje</i>	83
4.1.2. <i>Control por Open CV</i>	86
4.1.3. <i>Interfaz del usuario</i>	88
4.2. PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO.....	90
4.2.1. <i>Primera evaluación</i>	90
4.2.2. <i>Segunda evaluación</i>	91
4.2.3. <i>Tercera evaluación</i>	95
4.3. RESUMEN.....	98
CAPÍTULO 5.....	100
ANÁLISIS DE COSTOS.....	100
5.1. ANÁLISIS FINANCIERO.....	100
5.1.1. <i>Costos indirectos</i>	100
5.1.1.1. Costos de materiales directos.....	101
5.1.1.2. Costos de mano obra directa.....	102
5.1.1.3. Costos directos totales.....	103
5.1.2. <i>Costos indirectos</i>	104
5.1.2.1. Costos de materiales indirectos.....	104
5.1.2.2. Costos de mano de obra indirecta.....	104
5.1.2.3. Costos totales indirectos.....	104
5.1.3. <i>Costos totales</i>	105
CAPÍTULO 6.....	106
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106

6.1. CONCLUSIONES.....	106
6.2. RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Robótica Colaborativa	1
Figura 2:	W. Grey Walter	2
Figura 3:	Sistemas Multi-robots	2
Figura 4:	Robo Cup 2015	3
Figura 5:	Enjambres Robóticos	3
Figura 6:	Desplazamiento de objetos con robótica colaborativa.....	4
Figura 7:	Juego de pelota un robot	4
Figura 8:	KIKA Systems	5
Figura 9:	Enjambre de Robots de rescate	6
Figura 10:	Juego de pelota entre robots.....	7
Figura 11:	Posicionamiento de robots: (a) Cuadrado, (b) Círculo, (c) Triángulo ...	8
Figura 12:	Snake Robot.....	12
Figura 13:	Hormigas Biónicas.....	12
Figura 14:	Lego Robot (Cubos Robots)	13
Figura 15:	Juego de pelota entre robots.....	14
Figura 16:	Robot "Herbert" plataforma móvil	15
Figura 17:	Colaboración a.- Robótica b.- Animal	16
Figura 18:	Robots humanoides soldando	17
Figura 19:	Robot clasificador para tubos de ensayo.....	17
Figura 20:	Robot Curiosity de la NASA	17
Figura 21:	Enjambres Robóticos	18
Figura 22:	Robot Multi-tareas EFE	19
Figura 23:	Robots de revisión de fallas	19
Figura 24:	Arquitectura Centralizada	21
Figura 25:	Esquema de la Arquitectura Centralizada.....	22
Figura 26:	Arquitectura distribuida	22
Figura 27:	Esquema de la Arquitectura Distribuida.....	23
Figura 28:	Esquema de un Agente Software	25
Figura 29:	Esquema Sistema Multi-Agente	26
Figura 30:	Diagrama de bloques proceso de Visión Artificial.....	27
Figura 31:	Representación gráfica del modelo de color HSV	29
Figura 32:	Interfaz gráfica para la detección de un color.....	30
Figura 33:	Contornos filtro CANNY.....	31
Figura 34:	Esquema general del proyecto, sistemas generales y módulos.....	38
Figura 35:	Configuración Ackerman.....	40
Figura 36:	Configuración Triciclo.....	40
Figura 37:	Configuración Síncrono	41
Figura 38:	Configuración Diferencial	42
Figura 39:	Configuración Omnidireccional	42
Figura 40:	Diseño mecánico final	59
Figura 41:	Configuración Diferencial Fuente: (Molina & Rodriguez, 2014)	59
Figura 42:	TermoPro Mini servo SG90.....	60
Figura 43:	Parallax (Futaba S148) Continuous Rotativos Servo	61
Figura 44:	Diagrama de cuerpo libre.....	63
Figura 45:	Diagrama de cuerpo libre con carga distribuida	63
Figura 46:	Diagrama de cuerpo libre llanta trasera	64
Figura 47:	Placa autocoplador_ enconder	66

Figura 48:	Relación de transferencia de corriente vs Corriente directa	66
Figura 49:	Colector de corriente vs. Colector - emisor voltaje	67
Figura 50:	Configuración diferencial (posición y orientación)	68
Figura 51:	Combinaciones configuración diferencial	69
Figura 52:	Configuración diferencial (giro centro instantáneo de rotación)	69
Figura 53:	Variables análisis cinemático.....	70
Figura 54:	Diagrama de cuerpo libre.....	72
Figura 55:	Descripción de colores de trazado de trayectoria.....	73
Figura 56:	Trayectoria de trazado un solo robot (cuadrado)	74
Figura 57:	Trayectoria de trazado un solo robot (triángulo)	74
Figura 58:	Trayectoria de trazado un solo robot (círculo).....	75
Figura 59:	Trayectoria de trazado dos robots (cuadrado).....	76
Figura 60:	Trayectoria de trazado dos robots (triángulo).....	76
Figura 61:	Trayectoria de trazado dos robots (círculo)	77
Figura 62:	Diagrama de flujo general del proceso de generación de figuras geométricas.....	80
Figura 63:	Rueda Encoder	82
Figura 64:	Llantas de goma_ Parallax (Futaba S148) Continuous Rotation Servo	82
Figura 65:	Soportes servomotores_ Brazo lápiz.....	83
Figura 66:	Base robot móvil.....	83
Figura 67:	Ensamble servomotores, encoders incrementales, rueda loca	84
Figura 68:	Ensamble llantas traseras, servomotor de brazo porta marcador para trazado de trayectoria.....	85
Figura 69:	Ensamble brazo porta marcador	85
Figura 70:	Ensamble mecánico, electrónico y eléctrico final	85
Figura 71 :	PyDev Project asignación de interprete y librerías Python.....	86
Figura 72:	Creación de PyDev package y generación de un init_.py consola de programación	87
Figura 73:	Consola de programación Liclipse	87
Figura 74:	Python Run	87
Figura 75:	Selección cantidad de robots.....	88
Figura 76:	Reconocimiento de figuras geométricas	89
Figura 77:	Captación de imágenes y reconocimiento de figura	89
Figura 78:	Inicio de secuencia.....	90
Figura 79:	Primer prototipo plataforma móvil	91
Figura 80:	Segmentación de color HSV	92
Figura 81:	Cálculo del área _figura geométrica (cuadrado).....	93
Figura 82:	Cálculo del área _figura geométrica (círculo)	94
Figura 83:	Cálculo del área _figura geométrica (triángulo).....	94
Figura 84:	Trazo cuadrado con un robot	95
Figura 85:	Trazo de un círculo con un robot	96
Figura 86:	Trazo de un triángulo con un robot.....	96
Figura 87:	Trazo de un cuadrado con un robot	96
Figura 88:	Trazo de un cuadrado con dos robots	96
Figura 89:	Trazo de un triángulo con dos robots.....	97
Figura 90:	Trazo de un círculo con dos robots.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Detalle de necesidades y su importancia relativa.....	35
Tabla 2:	Lista de métricas	36
Tabla 3:	LISTA A.- Materiales comerciales y costo por m2.	36
Tabla 4:	LISTA B.- Procesos de maquinado y costo por minuto.....	37
Tabla 5:	Matriz de necesidades-métricas	37
Tabla 6:	Sistemas y Módulos del proyecto	39
Tabla 7:	Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de configuración	50
Tabla 8:	Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1	50
Tabla 9:	Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1.....	51
Tabla 10:	Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1.....	51
Tabla 11:	Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1	51
Tabla 12:	Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 1	52
Tabla 13:	Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de accionamiento para la estructura mecánica.....	52
Tabla 14:	Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1	53
Tabla 15:	Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1.....	53
Tabla 16:	Ponderación de software para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1.....	53
Tabla 17:	Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1	54
Tabla 18:	Resumen en la selección de alternativas del subsistema 2. Módulo 1	54
Tabla 19:	Ponderación de criterios de evaluación para la ubicación y planificación.....	55
Tabla 20:	Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2.....	55
Tabla 21:	Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2.....	55
Tabla 22:	Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2.....	55
Tabla 23:	Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2	56
Tabla 24:	Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 2	56
Tabla 25:	Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de control.....	56
Tabla 26:	Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3	57
Tabla 27:	Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo3.....	57
Tabla 28:	Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3.....	57
Tabla 29:	Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3	57
Tabla 30:	Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 3	58
Tabla 31:	Resumen de selección	58
Tabla 32:	Especificaciones técnicas mini servo SG90.....	61
Tabla 33:	Especificaciones técnicas servo motor.....	62
Tabla 34:	Características Técnicas ARDUINO UNO	67
Tabla 35:	Relación entre ángulos de giro y número de pulsos	73
Tabla 37:	Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria cuadrada con un robot.....	97
Tabla 38:	Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con un robot.....	97
Tabla 39:	Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria cuadrada con dos robots	98
Tabla 40:	Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con dos robots	98
Tabla 41:	Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con dos robots	98
Tabla 42:	Costos materiales eléctricos y electrónicos.....	101
Tabla 43:	Complementos electrónicos y eléctricos.....	101
Tabla 44:	Materia prima estructura mecánica	101
Tabla 45:	Complementos la estructura mecánica.....	102
Tabla 46:	Costos de complementos.....	102
Tabla 47:	Costos totales directos de materiales	102

Tabla 48:	Costos de mano de obra directa para la fabricación de la plataforma diferencial	103
Tabla 49:	Costo de mano obra directa para la fabricación de la plataforma diferencial	103
Tabla 50:	Costos directos totales para la fabricación de la plataforma diferencial	104
Tabla 51:	Costos de materiales indirectos para la fabricación de la plataforma diferencial	104
Tabla 52:	Costos de mano de obra indirecta para la fabricación de la plataforma móvil.....	104
Tabla 53:	Costos indirectos totales	105
Tabla 54:	Costos totales del proyecto	105

RESÚMEN

En la actualidad la robótica cooperativa es utilizada para realizar tareas complejas y repetitivas que el ser humano no desea hacer, basando la resolución de un problema en el comportamiento grupal. Por ende la resolución de una tarea compleja se convierte en varias tareas sencillas, obteniendo una mayor exactitud, adaptabilidad y disminución de costos informáticos y monetarios. El objetivo del presente proyecto es de otorgar dos robots móviles funcionales y robustos, que formen tres figuras geométricas básicas (cuadrado, triángulo, círculo) por medio del trabajo cooperativo. Con la finalidad de generar nuevos conocimientos y una línea de investigación respecto al tema. Para llevar a cabo el proyecto, se realizó un diseño mecánico del robot móvil, la ubicación y planeación para la generación de trayectorias y el control por medio de la visión artificial para que las dos plataformas formen las figuras geométricas básicas antes mencionadas. En el primer capítulo se expone una descripción general del proyecto, desde los objetivos planteados hasta el alcance del mismo. En el segundo capítulo se detalla el origen, significado, aportes al mundo y las aplicaciones de la robótica cooperativa en la actualidad. En el tercer capítulo se fundamenta en la selección de los diferentes módulos de cada sistema de la plataforma diferencial. En el cuarto capítulo se procede con la construcción y evaluación del rendimiento obtenido en la generación de cada figura geométrica. Finalmente en el último capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones que sirven como referencia para futuros proyectos.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA COOPERATIVA**
- **ROBOT MÓVIL**
- **TRABAJO COOPERATIVO**
- **PLATAFORMA DIFERENCIAL**

ABSTRACT

Nowadays cooperative robotics is applied to realize complex and repetitive tasks human beings do not want to do, basing the problem resolution on group behavior. Thus a complex task resolution becomes several simple tasks, obtaining a better accuracy, adaptability and reduction of the informatics and monetary values. The main reason for the present project is to grant to two functional and robust robots the capability to make three kind of basic geometric figures (square, triangle and circle) via cooperative work. With the goal of obtaining new knowledge and an investigation branch on this field. To carry out the project, a mechanic design of the mobile robot was made, the location and planning for the generation of the trajectory and an artificial visual control in order for the two platforms to form the aforementioned basic geometric figures. In the first part of this document a general description of the project is described, from the planted objectives to the reach of it. On the second chapter the origin, history, meaning, world contributions and cooperative robotics applications nowadays are detailed. The third chapter is based on the selection of the different modules of each system in the differential platform. On the fourth chapter the construction and the evaluation of the obtained performance in the generation of each geometric figure are proceeded. Finally in the last chapter the conclusions and recommendations that can be used as reference for future projects are exposed.

KEYWORDS

- **COOPERATIVE ROBOTICS**
- **MOBILE ROBOT**
- **COOPERATIVE WORK**
- **DIFFERENTIAL PLATFORM**

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se muestra el justificativo por el cual se construirá dos robots con trabajo cooperativo para la generación de formas geométricas básicas. Se realiza una breve revisión de la historia y aportes de la robótica cooperativa alrededor del mundo. Además, se define los objetivos generales y específicos, el alcance y el contenido general de cada capítulo que conformarán el presente proyecto. Algunos de los temas tratados aquí se los desarrollará en los próximos capítulos.

1.1. Antecedentes

En la actualidad el desarrollo tecnológico permite diseñar e implementar nuevos esquemas con una mayor complejidad, la robótica colaborativa y colectiva ayuda en la interacción entre un sistema con capacidad de aprendizaje y el ambiente, esto se realiza recogiendo información de diferentes elementos robóticos, lo que nos ayuda a obtener un alto grado de flexibilidad para resolver una gran variedad de tareas formando una sola base de conocimiento. (APOLO & VELASCO, 2013). Se puede observar un ejemplo de robótica colaborativa a través de un juego de fútbol entre varios robots móviles en la figura 1.

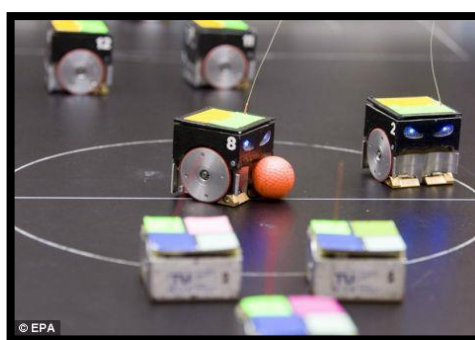


Figura 1: Robótica Colaborativa
Fuente: (Champions, 2015)

En 1948, W. Grey Walter da inicio al estudio de la robótica cooperativa con la construcción de dos plataformas autónomas que exploraban su entorno en busca de una fuente de luz y se dirigían hacia ella. Siendo este uno de los primeros avances en cuanto a robótica móvil. (MOLINA M. V., 2014), véase en la figura 2.



Figura 2: W. Grey Walter
Fuente: (Oxford, 1998)

Con el inicio de la robótica cooperativa en 1990, se empiezan a implementar los grupos multi-robot para trabajar en masa, realizando actividades como dispersarse, agregarse, buscar y seguir huellas. En estos estudios se concluye que la tarea que mejor realizan los grupos multi-robot involucra empujar objetos. (RUS, 1995). En la figura 3, se puede observar un sistema multi-robots dispersándose, para la formación de figuras bidimensionales con un control centralizado.

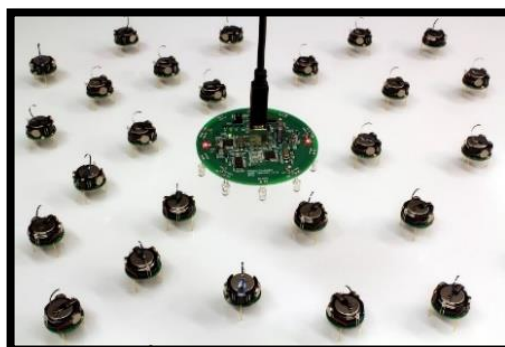


Figura 3: Sistemas Multi-robots
Fuente: (Zahumenszky, 2014)

En el siglo XX se desarrolla el primer prototipo de grupo de robots, capaces de realizar la planeación de trayectorias en diversos ambientes denominado “Martha”. El desarrolla una arquitectura de varios robots enfocada a realizar una tarea en específico. Una de las principales fallas que se presentó en estos trabajos cooperativos, fue la comunicación entre los individuos, es por eso, que en 1998, se propone una arquitectura para proveer a los equipos de robots distribuidos, la capacidad de tener tolerancia a fallas a nivel de comunicación. (ALAMI, 1998)

Con todos los avances logrados en la robótica cooperativa, se desarrolla la primera competencia entre sistemas multi-robots. Aparece en el año 1999 el robo-cup, un torneo que

busca incentivar el emprendimiento dentro de este campo, al incorporar una actividad que llame la atención de los investigadores. En este torneo los robots interactúan entre sí para asemejar su comportamiento al de los humanos, al realizar una actividad física como lo es el jugar fútbol, véase Figura 4. (Champions, 2015)



Figura 4: Robo Cup 2015
Fuente: (Champions, 2015)

El MIT trabaja con el concepto de “Enjambres Robóticos”, que es el estudio de diversas conductas de los grupos de animales para aplicarlas a las máquinas. Lo que hace posible controlar a muchos robots sin un controlador central, en lugar de tener un robot único complicado, surgió la idea de crear varios robots simples pero con la capacidad de resolver problemas en conjunto, como se ilustra en la Figura 5. Uno de sus estudios más destacados ha sido la selección de caminos más adecuados (menor distancia, menor cantidad de obstáculos) por parte de un grupo de robots. Para lo cual se ha usado la estrategia de “rastros” utilizada por las hormigas y por otras especies de animales, esto es seleccionar un camino por la cantidad de rastros que dejan las otras en él y así las demás seguirán esa trayectoria.(NAONE, 2001)



Figura 5: Enjambres Robóticos
Fuente: (Zahumenszky, 2014)

En los últimos años se han realizado diferentes investigaciones acerca de la robótica cooperativa en Ecuador como son: trasladar objetos a través de trayectorias (USIÑA & PALAQUIBAY, 2014), además de la intrusión en inteligencia artificial sus principios y

aplicaciones, el desarrollo de robots con ruedas como principios de la robótica cooperativa. (CARDENAS & SIMBAÑA, 2007)

A nivel institucional se han realizado investigaciones sobre los beneficios que tiene la robótica cooperativa y su utilidad en la sociedad: sistema de robótica cooperativa entre dos robots tipo Robo-nova para realizar el trabajo de mover objetos véase Figura 6, así como observar y resolver problemas de sincronización de los equipos, comunicación y movilidad (APOLO & VELASCO, 2013), sistema de robótica cooperativa entre dos robots humanoides Bioloid que simulen un juego al pasar una pelota como se aprecia en la Figura 7, de un lado al otro usando una unidad de procesamiento (TABANGO, 2014). Las cuales nos aportan con una gran cantidad de información acerca de este campo como son sus orígenes, características y algoritmos usados para optimizar movimientos de modo que ayude en las tareas a las personas de manera eficaz.

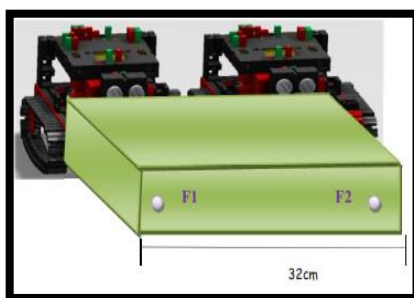


Figura 6: Desplazamiento de objetos con robótica colaborativa
Fuente: (APOLO & VELASCO, 2013)



Figura 7: Juego de pelota un robot
Fuente: (TABANGO, 2014)

Si bien la idea de que trabajen los robots de manera conjunta en la resolución de problemas, no es nueva, ya que en los últimos años se ha desarrollado alternativas de control, gestión y un claro ejemplo se ve reflejado en el despacho de mercancías de forma automatizada. Que ha pasado de ser un negocio de solo implementación, a un diseño estructurado en donde la relación hombre-máquina es casi perfecta, un ejemplo claro de ello, es el sistema de gestión de inventario

KIVA, de la empresa KYVA Systems. (MASON, 1985), En la Figura 8, podemos observar la estructura de una estación KIVA.

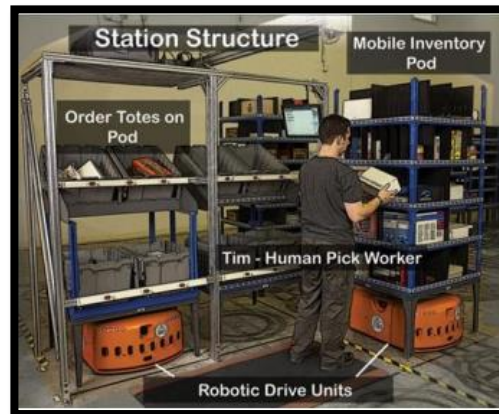


Figura8: KIVA Systems
Fuente: (Systems, 2010)

El sistema en especial hace uso de una serie de servidores o estaciones para la carga y despacho de las diferentes mercancías, las cuales se encuentran etiquetadas y organizadas en estantes plásticos de una manera óptima.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar un sistema de generación de trabajo cooperativo que nos permita la ubicación de elementos robóticos en puntos específicos, mediante el desarrollo de algoritmos para trayectoria y posicionamiento.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema mecánico que nos permita optimizar el desempeño de cada robot a través del estudio de modelos previos.
- Diseñar un sistema eléctrico y electrónico con el fin de dotar de un cierto nivel de autonomía a cada robot que les permita adaptarse a su entorno.
- Comparar diversos algoritmos de la robótica cooperativa con el fin de seleccionar el que nos permita obtener mejores resultados a nuestro problema.
- Determinar el protocolo de comunicación para el envío y recepción de las posiciones que son tomadas por cada robot utilizando una red inalámbrica.

1.3. Justificación e importancia

Se realiza el diseño y desarrollo de dos robots móviles con trabajo cooperativo, los cuales tendrán características similares entre ellos, dotados de un sistema de visión artificial para el reconocimiento de figuras que desea el usuario realizar. Además, se cuenta con una central de procesamiento de información y toma de decisiones con la implementación de algoritmos. Así conformarán un solo sistema para completar una tarea que en este caso será la generación de figuras geométricas básicas.

La implementación de sistemas de robótica cooperativa en la solución de problemas complejos ha sido estudiada durante las últimas décadas y en la actualidad se presenta como una tecnología ampliamente insertada en ámbitos cotidianos de la humanidad. Las ventajas de la cooperación robótica están en la resolución de una tarea compleja convirtiéndola en varias tareas sencillas, obteniendo mayor exactitud, adaptabilidad y disminución de costos informáticos y monetarios. Esto se ve reflejado en el presente proyecto, ya que servirá como un precedente para la investigación y desarrollo de la robótica dentro de nuestra institución, así como fortalecerá los conocimientos de robots móviles y algoritmos de trayectorias, material que ayudará a docentes y estudiantes en futuras investigaciones.

Por ejemplo, en la Figura 9, se puede observar una aplicación en la cual, un enjambre de robots se dirige de manera coordinada y meticulosa, al rescate de una persona que simula estar en peligro.



Figura 9: Enjambre de Robots de rescate
Fuente: (Aberron, 2008)

Los algoritmos permiten resolver varios problemas que se presentan al tener más de un robot como lo son la interferencia entre robots, ya sea por su tipo de programación así como el

control, lo que con lleva a golpes, choques o distracciones. Por tanto la visión artificial, la ubicación y planeación de trayectorias, permiten asegurar que cada robot móvil realice el trabajo que le corresponde, para la generación de figuras geométricas básicas. Porque a pesar de que cada plataforma tiene características idénticas, la diferenciación parte de la comunicación para el envío de datos de la central a cada robot por medio de la asignación de un puerto serial COM distinto a cada bluetooth incorporado.

Un ejemplo muy claro de dicho problema, es cuando un equipo de robots tienen por objetivo seguir una pelota como se puede ver en la Figura 10, los robots pueden confundir la pelota con otro robot, una comunicación más rápida y precisa significa mayor dificultad en su diseño, el consumo de energía e interferencias con otros sistemas, incertidumbre respecto a otros robots, la pérdida de eficacia del sistema cuando un robot deja de realizar una tarea pensando que ya se llevó a cabo o realiza un trabajo ya elaborado por su compañero.(APOLO & VELASCO, 2013)

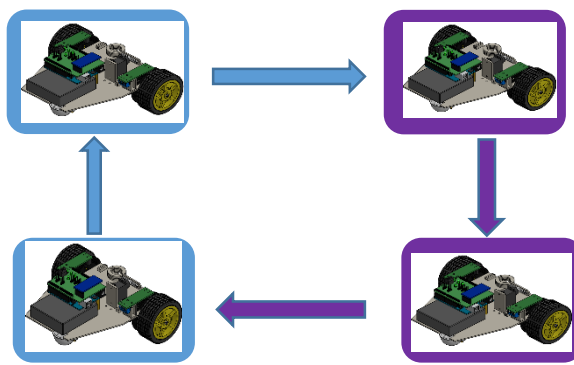


Figura 10: Juego de pelota entre robots
Fuente: (TABANGO, 2014)

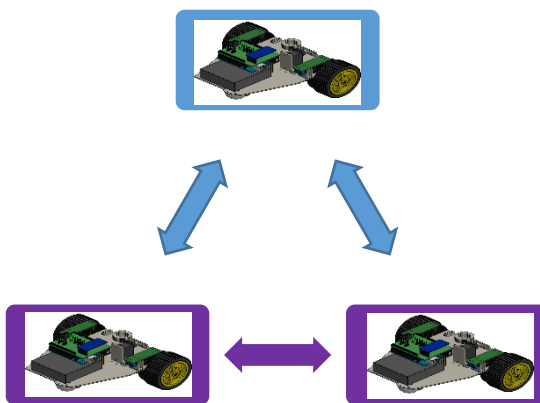
1.4. Alcance

El alcance del proyecto es diseñar e implementar un sistema robótico colaborativo basado en dos robots, los cuales permiten la generación de trayectorias para el trazado de figuras geométricas, estos robots contarán con un sistema central de procesamiento que se encargará de enviar y recibir datos de un sistema de visión artificial a cada robot.

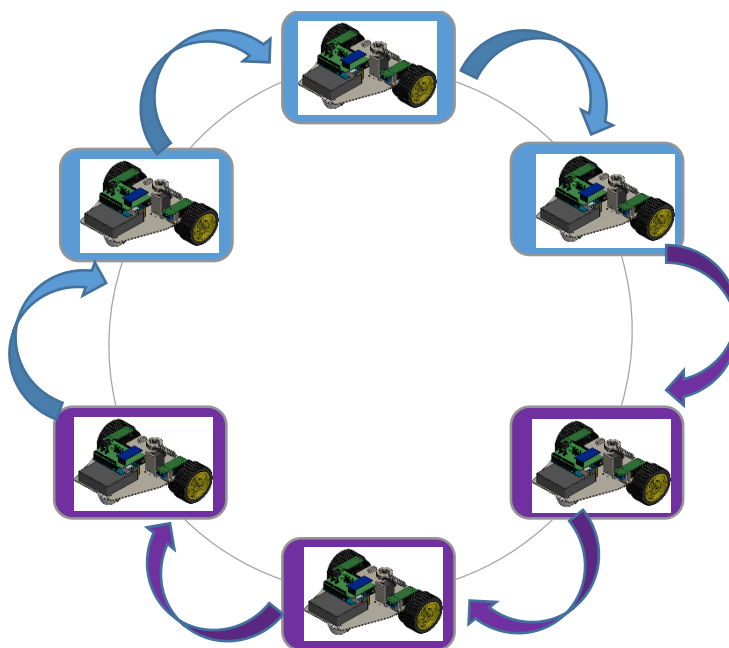
En la Figura 11, se puede observar la secuencia de movimientos que realizarán los robots para generar figuras geométricas.



(a)



(b)



(c)

Figura 11: Posicionamiento de robots: (a) Cuadrado, (b) Círculo, (c) Triángulo

El sistema se controla a través de software libre en el cual se probará diferentes algoritmos de control existentes para la generación de trayectorias y posicionamiento de robots. Descartando aquellas que no brinden los beneficios necesarios, con ello se definió de manera adecuada el más acorde a nuestras necesidades.

1.5. Descripción general del proyecto

El presente proyecto propone diseñar y construir dos robots que permiten la implementación de algoritmos de robótica cooperativa. Los cuales cuentan con diferentes sistemas embebidos para el control de cada uno, además de la comunicación entre ellos y con el operario mediante una aplicación gráfica.

La ubicación de cada robot se realiza en torno a una planeación previa de cada trayectoria para la representación de figuras geométricas. Por medio de la visión artificial se reconoce el contorno y color de cada figura requerida por el usuario, dando una retroalimentación de dichos datos a cada robot móvil. Los mismos que se envían por medio inalámbrico, para la generación de cada figura, todo esto complementado con el algoritmo de robótica cooperativa.

Cada robot está constituido por una estructura mecánica tipo diferencial conformada por dos llantas traseras ubicadas perpendicularmente a la dirección del robot, controladas por un servomotor individual, de tal manera que los diferentes giros que se realice la velocidad se puede modificar. Por ello si el robot gira a la izquierda, el motor de la llanta derecha tendrá una velocidad mayor. Para solventar el problema de cabeceos por el cambio de dirección, se añade una rueda loca, que gira libremente de acuerdo a la velocidad que tenga el robot.

1.6. Estructura del documento

El presente proyecto, contiene en su estructura 6 capítulos, en los que se detalla toda la información necesaria y pertinente, para la elaboración e implementación del sistema robótico colaborativo.

Se presenta la principal teoría de los diferentes componentes que poseen los sistemas robóticos, conocimientos fundamentales para el entendimiento del presente proyecto, en el capítulo 2 (Estado del arte). Se describen los sistemas de control para software y hardware, las aplicaciones, ventajas y desventajas que sustentan la importancia del proyecto.

Se realiza un análisis de modelos de vehículos robóticos existentes en el capítulo 3 (Diseño), describiendo las necesidades y requerimientos que se pretende cumplir. También se presenta la selección de componentes y conceptos para los sistemas mecánicos, electrónicos y de control. Finalmente se presenta el diseño que cumpla con las especificaciones establecidas al inicio del capítulo.

Se describe todo el desarrollo para la elaboración y ensamblaje de las distintas piezas indispensables para la configuración de los robots móviles, en el capítulo 4 (Construcción y pruebas). Se detalla todos los resultados conseguidos, posteriores a las pruebas ejecutadas por los distintos sistemas.

Se analiza la rentabilidad de diseño, construcción y montaje de los robots móviles para realizar trabajo cooperativo, en el capítulo 5 (Análisis económico). Se detalla un análisis de costos directos, indirectos y de producción del proyecto.

Se examina los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el capítulo 6 (Conclusiones y recomendaciones). Posteriormente se elabora las recomendaciones a partir de las conclusiones del proyecto.

Capítulo 2

Estado del arte

En el capítulo se describe la importancia del proyecto fundamentada en la base teórica del documento. En primer lugar se revisa los puntos más importantes entorno a la robótica cooperativa, como lo son: su historia, origen, desarrollo actual entre otros. En la primera parte se termina explicando las ventajas y desventajas que tiene la implementación de sistemas de robótica cooperativa. En segundo lugar se describe los diversos sistemas de control tanto de hardware como de software que se han desarrollado para sistemas colaborativos. Permitiendo determinar de mejor manera las características que tendrá el proyecto.

2.1. Robótica Colaborativa

La robótica colaborativa consiste en un grupo de robots interactuando varios miembros entre sí, no necesariamente colocados en posiciones predeterminadas para realizar una tarea. La solución de un problema está ligado a un concepto como lo es la inteligencia colaborativa, es decir la manera de solucionar el problema surge del comportamiento del grupo. Dicha inteligencia hace al sistema robusto, al existir varios individuos se puede repartir las tareas y en caso de que un miembro no pueda concluir su tarea cualquiera de los otros puede tomar su lugar y terminarla.

Uno de los fenómenos más utilizados se basa en la forma como los animales generan movimientos coordinados de locomoción o los generadores centrales de patrones. En la robótica cooperativa son usados CPG (Centros de control de movimiento), para generar movimientos coordinados entre diferentes robots de una estructura descentralizada, dotando a cada robot con uno o varios CPG's. (MORENO, 2010), como se puede observar en la Figura 12.

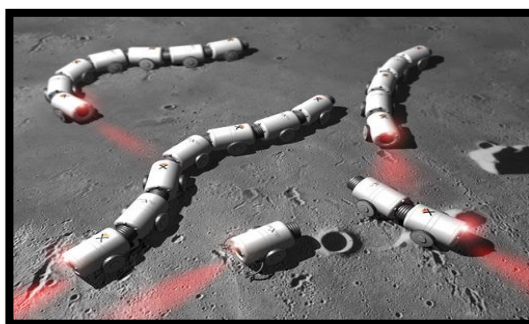


Figura 12: Snake Robot
Fuente: (Robotic-Zoo, 2013)

Otro tipo de control está basado en el comportamiento de los animales, así como en la solución de un problema de manera grupal. En el caso de la robótica cooperativa se centra en la complejidad que posee cada robot. La emisión de señales de control puede ser llevada a cabo por un robot coordinador o por la ocurrencia de un evento externo. El control multi-agente es el más utilizado para realizar este tipo configuraciones. (MORENO, 2010), véase Figura 13.

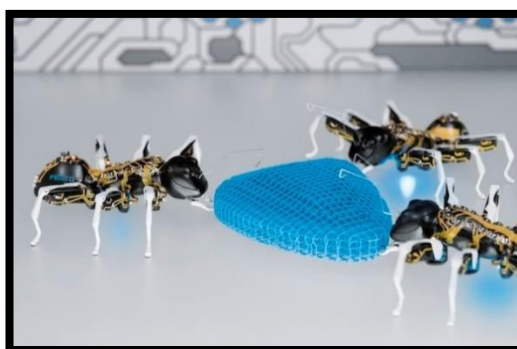


Figura 13: Hormigas Biónicas
Fuente: (FESTO, IEEE SPECTRUM, 2015)

Los sistemas colaborativos se diferencian por tener múltiples individuos trabajando como una sola célula, que pueden realizar tareas variadas y precisas que las que realizaría un solo robot, siendo la única limitación su propia estructura física.

No siendo la única definición de sistemas colaborativos, ya que existen varias definiciones en la literatura, como se muestra a continuación:

- “la unión de comportamientos colaborativos que está dirigido hacia algún objetivo en el cual hay un interés o una recompensa común” (Gray, 1991),
- “una forma de interacción, usualmente basada en la comunicación” (M.J.Mataric, 1994),

- “la unión (de varios individuos) para hacer algo que crea un resultado progresivo como el incremento de rendimiento o el ahorro de tiempo” (Yuta., 1990).

Además muchos autores hablan adicionalmente de los beneficios que brinda la robótica cooperativa. Según Fukunaga, la robótica cooperativa puede ser interesante por tres razones:

- “Las tareas pueden ser muy complejas o imposibles de resolver para que las resuelva un robot solo, o bien pueden haber mayor rendimiento al usar múltiples robots”. (Y.U. Cao, 1997, pág. 4)
- “Construir y usar varios robots simples puede ser más fácil, más barato, más flexible y más tolerante a fallos que tener un único robot para cada tarea por separado”. (Y.U. Cao, 1997, pág. 7)
- “La robótica cooperativa puede dar luces en problemas fundamentales de las ciencias sociales (teoría de la organización, economía, psicología cognitiva), y de las ciencias naturales (biología teórica, etología animal)”. (Y.U. Cao, 1997, pág. 27)

2.1.1. Historia de la robótica cooperativa

El inicio de la robótica cooperativa en 1990, fue la implementación de los grupos multi-robot para que realizarán actividades como buscar, seguir huellas, dispersarse, e integrarse (J. Deneubourg, 1990). La tarea que mejor realizaban los grupos multi-robot involucraba el empujar objetos que se concluyó en estudios posteriores como se puede observar en la figura 14 (D.Rus, 1998).

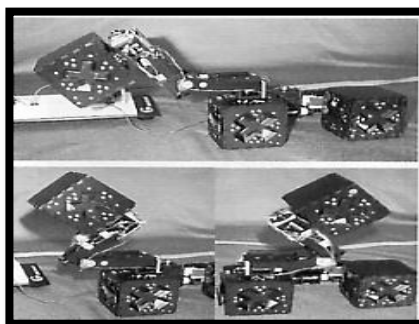


Figura 14: Lego Robot (Cubos Robots)
Fuente: (Midstorms, 2013)

Se desarrolla un sistema robótico celular distribuido llamado CEBOT (Kawauchi, 1990), inspirado en los intercambiadores rápidos de herramientas de máquinas CNC introduciéndolo en los años setenta.

A finales del siglo XX se lleva a cabo el primer proyecto llamado Martha que se basa en el esfuerzo de proveer a un grupo de robots la habilidad de realizar planeación de trayectorias (Alami, 1998). Uno de los principales errores que se presentó a lo largo de estos trabajos cooperativos, fue la comunicación entre los individuos, por ello en 1998, se propone una arquitectura para proveer a los equipos de robots la capacidad de tener tolerancias a errores a nivel de la comunicación (Parker, 1998).

Los avances logrados en la robótica cooperativa, se desarrolla la primera competencia entre sistemas multi-robot. En 1999 se da la RoboCup, un torneo que busca incentivar los avances de la misma. En este torneo los robots interactúan entre sí para asemejar su comportamiento al de los humanos, véase figura 15 (LARC_LARS_ORE, 2013).

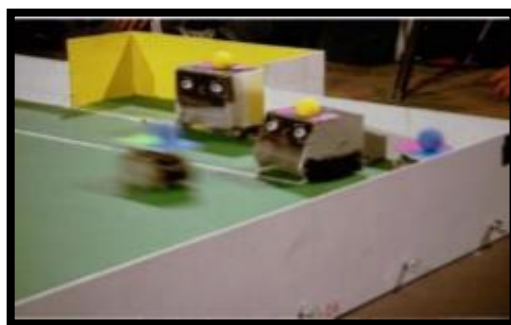


Figura 15: Juego de pelota entre robots
Fuente: (RoboCup, 1999)

En estas investigaciones se concentraron en el desarrollo de los componentes mecánicos de los robots cooperativos, tiempo después se lograron avances sobre los algoritmos distribuidos para el control (D.Rus, 1998) y el descubrimiento dinámico de cambios topológicos en la estructura para ajustar los patrones de comportamiento (W.M. Shen, 2000).

El interés por estudiar la visión de un grupo de robots, se busca implementar en trabajos como localización, mapeo y exploración. Con el fin de investigar en la visión de grupos multi-robots, se describen categorías basadas en uso de puntos de referencia y en grafos (Goksel Dedeoglu, 2000).

En las últimas décadas, la tecnología ha ido desarrollándose y ampliando sus intereses en imitar comportamientos desarrollados en la naturaleza. Así es como nace la robótica colaborativa cuyo objetivo es diseñar y controlar sistemas que sean capaces de resolver un problema en conjunto, en donde la intervención de un solo robot no es lo suficiente o resulta costoso.

Alrededor de la historia, la robótica móvil siempre ha abordado el problema de movilizarse de un lugar a otro por medio de sensores, planeación y control. El problema de la navegación todavía consiste en encontrar una trayectoria adecuada desde el inicio hasta el final. En la actualidad se sigue investigando, en busca de una respuesta que permita llevar a la robótica cooperativa móvil a aplicaciones útiles para la sociedad.

2.1.2. Origen de la robótica cooperativa

El origen de la robótica cooperativa se remonta a finales de la década de los cuarenta con W. Grey Walter que realizó la investigación y desarrollo de plataformas con un nivel de autonomía que no se había visto antes (MOLINA & RODRIGUEZ, 2014). Posteriormente el avance más representativo se dio a inicios de la década de los sesenta en la Universidad Johns Hopkins con la presentación de robots capaces de ubicarse y desplazarse automáticamente (BROOKS R.A, 1986), como se puede observar en la Figura 16.



Figura 16: Robot "Herbert" plataforma móvil
Fuente:(American, 2011)

En las siguientes décadas el principal motivo de investigación fue la distinción entre sociedades y agrupaciones de animales. Aunque ambos términos hacen referencia a un grupo de individuos de la misma especie, pero el término sociedad se refiere a individuos organizados, los cuales poseen conductas cooperativas. Mientras el término agrupación define a individuos reunidos espacialmente y no necesariamente organizados en conductas cooperativas. (BUILES, CARRANZA, & BEDOYA, 2008).

En la Figura 17, podemos ver la semejanza que existe entre sistemas robóticos y grupos de animales, para cumplir un objetivo en común.



(a)

(b)

Figura 17: Colaboración a.- Robótica b.- Animal
Fuente: (American, 2011)

Los animales conforman sociedades para trascender sus capacidades individuales. En el caso de agrupaciones particulares pueden aumentar la eficiencia y ahorro de energía gracias a la coordinación de sus movimientos individuales.

Con el desarrollo de la tecnología los robots se transformaron en sistemas más complejos, lo que aumenta el tiempo de diseño y construcción así como los costos de los mismos. La robótica colaborativa puede tener varios robots que ejecuten ciertas partes de un proceso en lugar de tener uno solo para ejercer una tarea complicada por tanto se aumenta la eficiencia y se disminuye la complejidad de cada robot.

2.1.3. Desarrollo en la actualidad de la robótica cooperativa

En la actualidad se utiliza a los robots para llevar a cabo tareas sucias, peligrosas, duras y repetitivas que los humanos no desean hacer. Están enfocados principalmente a un uso industrial, de desarrollo e investigación, los ámbitos más destacables de uso son:

- Automoción.- en el cual los robots realizan tareas repetitivas y enlazadas como: soldadura, pintura y ensamblaje de piezas, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18: Robots humanoides soldando
Fuente: (VALLEY, 2015)

- Medicina.- Son de gran ayuda en este tipo de campos como la investigación y para trasladar ensayos peligrosos y mover objetos, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19: Robot clasificador para tubos de ensayo
Fuente: (FESTO, EDUTELSA, 2015)

- Exploración.- Son usados para observar el fondo oceánico y lugares que son de difícil acceso para los humanos, como se muestra en la Figura 20.

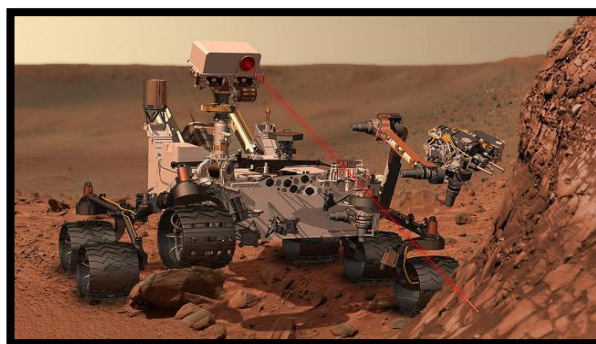


Figura 20: Robot Curiosity de la NASA
Fuente:(NASA, 2015)

- Comportamiento animal.- En la imitación de comportamientos que han sido desarrollados con efectividad por la naturaleza. Por ejemplo imitar el comportamiento de una bandada de pájaros. Donde cada robot se rige a cuatro

reglas muy sencillas de interacción y percepción local, como se muestra en la Figura 21:

1. Evitar la colisión con los otros robots de la bandada.
2. Correspondencia de velocidad: lo cual se refiere a que cada robot intentara mantener la misma velocidad que sus colegas más cercanos.
3. Agrupamiento: Cada robot intentará acercarse a sus colegas sin colisionar.
4. Velocidad de viaje: La banda de robots deberá seguir un rumbo con velocidad constante.(Rodrigo, 2013)



Figura 21: Enjambres Robóticos
Fuente: (PROYECT-ROBOT, 2014)

El principal objetivo en la actualidad para estos sistemas es el reducir el tamaño de los robots y mejorar la comunicación entre ellos. (SALAZAR ARCUCCI, 2013)

2.1.4. Clasificación por nivel de comunicación de los sistemas robóticos

Por el nivel de comunicación e interacción entre los distintos robots de un sistema se los clasifica de la siguiente manera:

- Muy acoplados
- Poco acoplados

2.1.4.1. Muy acoplados

Todo individuo tiene su propia inteligencia juntamente con la capacidad de comunicación, por lo tanto, cooperación y coordinación entre sí, se puede decir a la inteligencia cooperativa como la unión de las inteligencias de cada uno de los individuos.

Cada robot debe tener la capacidad suficiente de transferir información a otro compañero. Y contar con la inteligencia suficiente para pedir ayuda y coordinar movimientos con otros miembros del equipo, como se puede observar en la Figura 22.

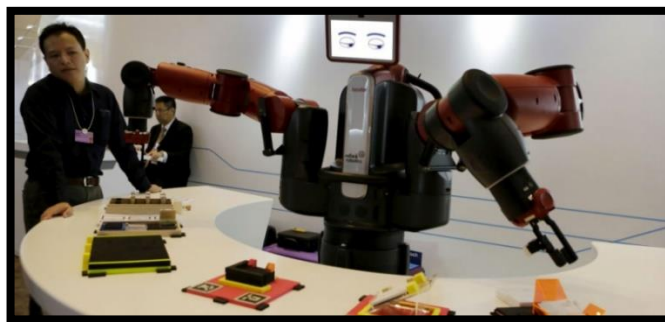


Figura 22: Robot Multi-tareas EFE
Fuente: (SUIZA ROBOTICS, 2015)

2.1.4.2. Poco acoplados

Cada robot de este tipo sigue un conjunto de reglas por lo que el control es distribuido. No existe ningún tipo de comunicación entre los robots o una unidad central. El tipo de robots no toman en cuenta los movimientos y acciones de otros robots.

Por ejemplo varios robots aspirando distribuidos en diferentes lugares de un hogar. Cuyo trabajo es más rápido ya que no necesita una comunicación, porque cada robot está programado para ejercer su sistema y realizar su tarea, como se observa en la Figura 23.



Figura 23: Robots de revisión de fallas
Fuente: (MCLOUGHLIN, 2015)

2.1.5. Aplicaciones de la Robótica Cooperativa

La robótica colaborativa se ha orientado a resolver problemas en los que un robot es insuficiente para cumplir con el objetivo o diseñar uno que realice tal objetivo sea muy costoso. Tomando en cuenta estas primicias la robótica colaborativa, se ha empleado en el transporte de objetos voluminosos, manejo de material peligroso, exploración en áreas de riesgo y cobertura de terreno.

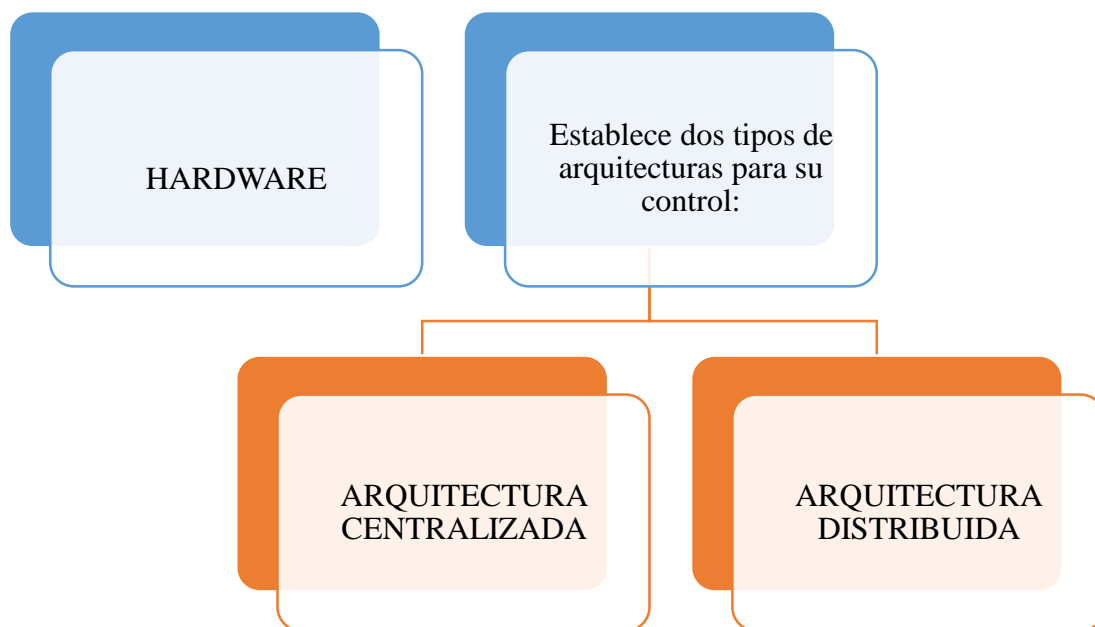
En el mundo se han seguido desarrollando nuevas aplicaciones con una amplia versatilidad frente a otros tipos de sistemas. El propósito general es sustituir a los antiguos sistemas de manejo de productos, por tanto los robots se dividirán las tareas a realizar. Por tanto la comunicación

entre ellos, sensores, puedan esquivar obstáculos, reemplazar a un robot que ha sufrido un daño, completar su tarea y evitar realizar tareas ya concluidas.

El siguiente nivel de investigación que se realiza en la actualidad, es la de los robots humanoides, ya que poseen una gran funcionalidad al trabajar como herramientas diseñadas para los humanos y con el propósito experimental de poder estudiar diferentes aspectos del cuerpo humano.

2.2. Sistema De Control De Robótica Cooperativa

2.2.1. Hardware



2.2.1.1. Arquitectura Centralizada

En esta arquitectura se tienen varios robots los cuales dependen de una unidad central, de donde se obtienen órdenes necesarias para realizar su función de la manera más adecuada. Cada robot adquiere datos indispensables de su entorno con el uso de sensores y esta información es enviada a la unidad central para ser procesada y tomar decisiones, véase Figura 24.



Figura 24: Arquitectura Centralizada
Fuente: (SWARMANOID, 2011)

Ventajas:

- **Espacio:** los robots con esta arquitectura pueden ser más pequeños debido a que el robot sólo tiene una tarjeta.
- **Robustez ante fallos e impactos:** debido a que el diseño es más compacto, la arquitectura es más robusta ante impactos y fallos.
- **Coste:** al tener pocos componentes el coste del sistema es menor que en el caso de una arquitectura distribuida.

Desventajas:

- **Mantenimiento del sistema:** es complicado encontrar un fallo en la arquitectura, ya que las tareas se realizan todas en la misma tarjeta e inevitablemente unas interaccionan con otras.
- **Ampliabilidad:** es la mayor desventaja del sistema. Por bien que se haya diseñado una arquitectura centralizada, es complicado lograr una ampliación de las tareas de la misma, ya que eso en general supondrá una modificación del hardware de la tarjeta. Generalmente este tipo de arquitecturas suele contar con las llamadas tarjetas de expansión que amplían las funcionalidades de la misma.
- **Coste de desarrollo:** es mayor ya que aunque sólo es necesario diseñar una tarjeta, la labor de integración de todas las tareas en un sólo módulo hace que el coste de desarrollo se eleve en gran medida.
- **Congestionamiento de información:** la unidad central recibe información continua de todos los robots, por tanto la toma de decisiones le llevara un tiempo mayor, siendo un gran inconveniente en la robótica cooperativa.

En la Figura 25, podemos observar el esquema general que tiene la arquitectura centralizada.

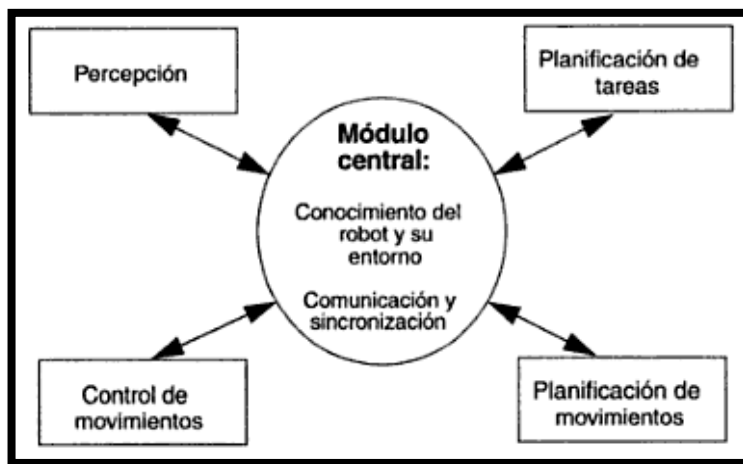


Figura 25: Esquema de la Arquitectura Centralizada
Fuente: (MOLINA & RODRIGUEZ, 2014)

2.2.1.2. Arquitectura Distribuida

En esta arquitectura se tienen varios robots los cuales deciden como actuar de manera independiente por medio de percepción de su entorno, sin necesidad de recibir órdenes externas, evitando el envío y almacenamiento de datos en una central, véase Figura 26.

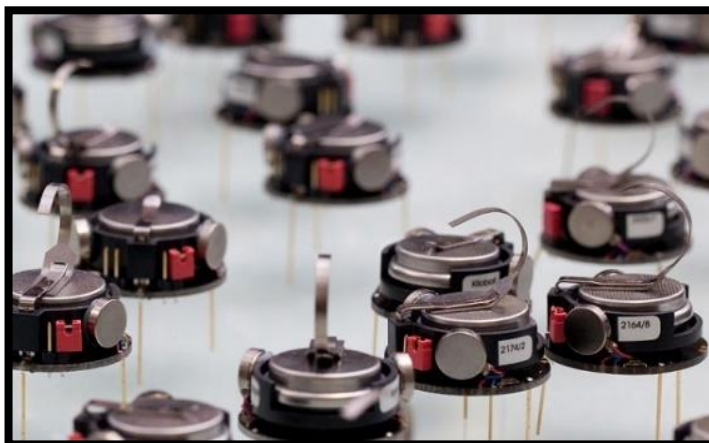


Figura 26: Arquitectura distribuida
Fuente: (ZAHUMENZKY, 2014)

Ventajas:

- Mantenimiento del sistema: es fácil de encontrar fallos de funcionamiento del sistema gracias a su modularidad. Además en caso de fallo de un módulo solamente hay que sustituir una tarjeta.

- Ampliabilidad: es la mayor ventaja del sistema. Se puede añadir una nueva funcionalidad al sistema sin esfuerzo. Por ejemplo, si a un sistema existente se le quiere añadir un sistema extra de comunicaciones por infrarrojos, lo único que se debe hacer es conectar una tarjeta de comunicaciones de IRDA al robot.
- Coste de desarrollo: es menor ya que el desarrollo del sistema se reduce al implementar cada una de las tarjetas, eliminando los costes de integración que suelen ser muy elevados.

Desventajas:

- Espacio: los robots con esta arquitectura son grandes ya que el robot tiene que albergar a varias tarjetas.
- Fallo de conexiones: al haber varias tarjetas interconectadas entre sí, el robot suele tener muchos cables a lo largo del mismo, lo que hace que aumente la posibilidad de fallo por un error en una conexión. Por lo tanto, el diseño de los conectores de las tarjetas es crítico.
- Índice de fallos: el número de componentes que tiene una arquitectura distribuida es mucho mayor que en una arquitectura centralizada. Cuantos más componentes tenga un sistema, mayor es su probabilidad de fallo.
- Coste: al tener más componentes el coste del sistema es mayor.

En la Figura 27, podemos observar el esquema general de una arquitectura distribuida.

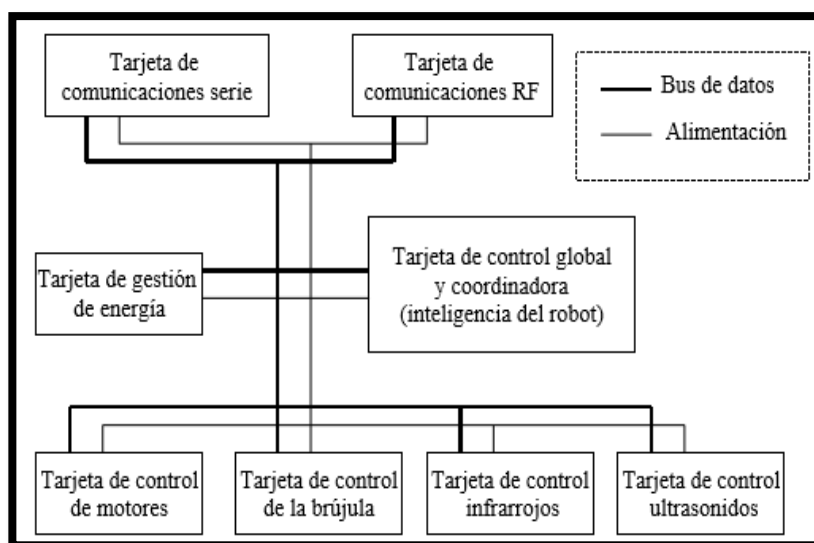


Figura 27: Esquema de la Arquitectura Distribuida
Fuente: (MOLINA & RODRIGUEZ, 2014)

2.2.2. Control por Software

Para el control por software en robótica colaborativa se utilizan diferentes tipos de algoritmos basados en sistemas multi-agentes, los cuales son estructurados y acondicionados de acuerdo a la necesidad que cumplan.

2.2.2.1. Agente Software

En la robótica cooperativa el término agente describe una forma compleja de software, que es capaz de actuar con cierto grado de autonomía, para cumplir tareas en representación de personas. El agente es definido por su propio comportamiento, fueron desarrollados dentro de la Inteligencia Artificial y, a partir de los trabajos investigativos en el área de la Inteligencia Artificial Distribuida (DAI), surge el concepto de sistemas multi-agente. (ANDÉS, 2011)

En la Figura 28, podemos observar el esquema de propiedades de un agente software. El concepto de agente muchos autores lo relacionan con conceptos tales como:

- Persistencia: el código no es puesto en marcha en demanda, sino continuamente razón por la cual decide cuándo debe realizar una tarea preestablecida.
- Autonomía: tienen la capacidad de seleccionar tareas, priorizar, comportarse de acuerdo a un objetivo y toma de decisiones.
- Habilidad social: pueden acoplar otros componentes por medio de un tipo de comunicación y coordinación.
- Reactividad: perciben el contexto en el que operan y responden a este de la manera más adecuada.

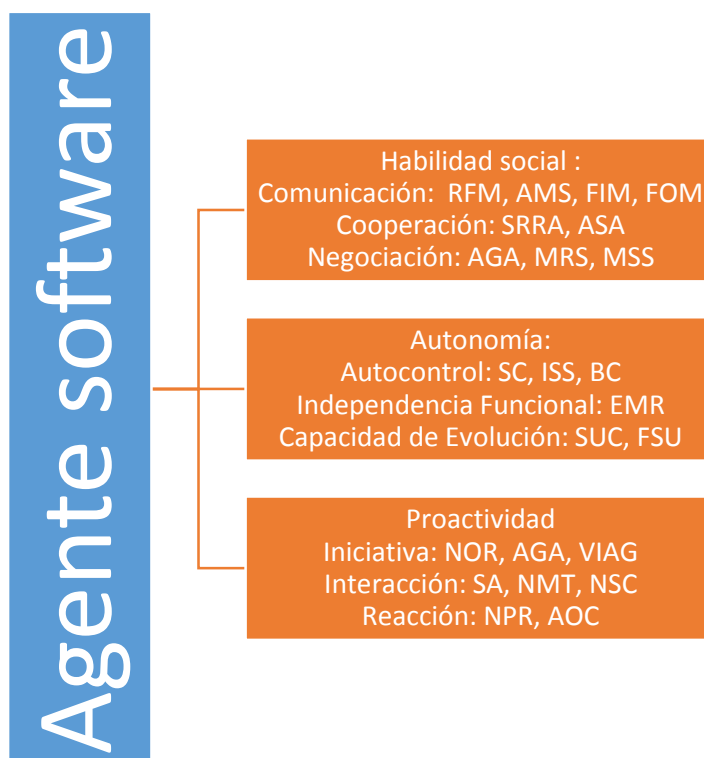


Figura 28: Esquema de un Agente Software
Fuente: (CHILEROBOTICS, 2014)

Un agente debe cumplir con la necesidad de continuidad y autonomía al llevar a cabo actividades de forma flexible e inteligente como respuesta a cambios en su entorno. De forma ideal se pretende que los agentes adquieran experiencia al funcionar continuamente en un entorno así como adquirir habilidades de comunicación y cooperación con otros agentes. (ANDÉS, 2011)

2.2.2.2. Sistema Multi-Agente

Sistema en el cual interactúan varios agentes para poder realizar una tarea en común. Su objetivo global, es permitir la organización de agentes por medio de características similares, para lo cual cada agente debe ser capaz de manipular ampliamente su percepción del medio en el que se encuentra, así como la capacidad para comunicar esta información.

El tiempo de reacción o toma de decisiones es crítico en este tipo de sistemas ya que al ocurrir eventos imprevistos se debe realizar una rápida evaluación y cambios necesarios para poder corregir algún parámetro si es necesario.

En la Figura 29, podemos observar el esquema distribuido de un sistema multi-agente

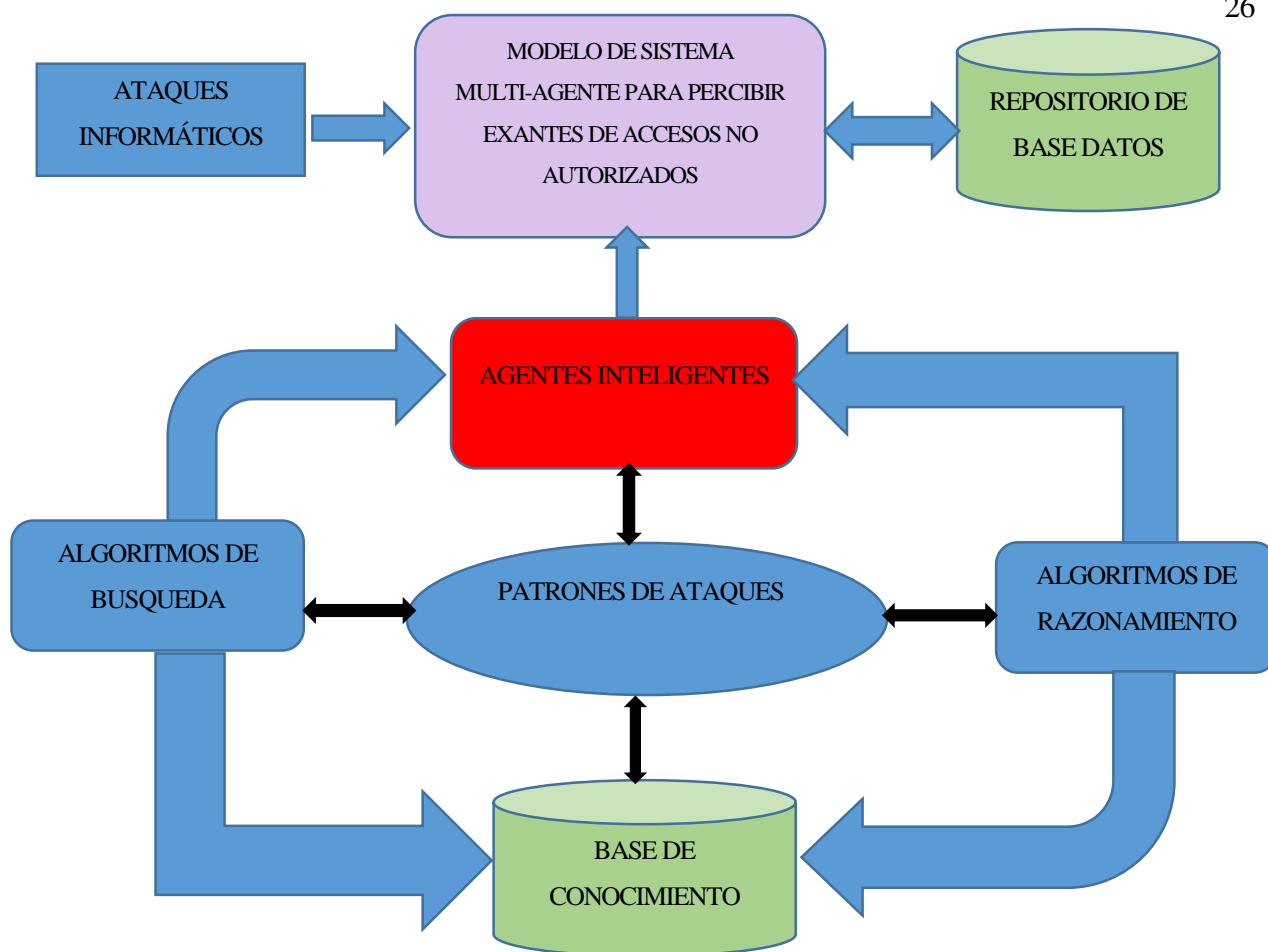


Figura 29: Esquema Sistema Multi-Agente
Fuente:(MOLINA & RODRIGUEZ, 2014)

2.2.2.3. Comunicación entre agentes

La comunicación es uno de los aspectos más importantes en un sistema multi-agente ya que esto nos permitirá potenciar el sistema.

a. Arquitectura de pizarra

La pizarra es una zona de trabajo común donde se encuentra la información a compartir. Esta pizarra puede ser consultada por todos los agentes, del mismo modo que todos pueden dejar información en ella. Pueden existir agentes con tareas de control específicas sobre la pizarra, así como varias pizarras. De este modo, no hay comunicación directa entre los agentes, teniendo toda la información centralizada en cada una de las pizarras. (ANDÉS, 2011)

b. Paso de mensajes

La comunicación se realiza del mismo modo que se realiza entre dos seres humanos, mediante el establecimiento e intercambio directo de mensajes entre dos agentes (emisor y

receptor). Como ventaja encontramos que es más flexible que la anterior, además de que no es necesario tener toda la información centralizada. (ANDÉS, 2011)

2.3. Visión Artificial aplicada a la detección de figuras geométricas

2.3.1. Generalidades

Pertenece a una rama de la inteligencia artificial, cuyo objetivo es el moldeamiento matemático de procesos de percepción visual en los seres humanos y la generación de simulaciones de dichas capacidades visuales a través de un computador.

Nos permite el reconocimiento de propiedades geométricas del material, luminosidad u oscuridad de superficies y la estructura de todo el mundo dinámico que tenemos a nuestro alrededor. Con el uso de imágenes a color o monocromáticas, bidimensionales de dicho espacio, las cuales pueden ser captadas por medio de una cámara estática o en movimiento.

La visión artificial está formada por un conjunto de procesos que realizan el análisis de imágenes. Dichos procesos son los siguientes:

- Captación de imágenes
- Memorización de la información
- Procesado e interpretación de resultados

En la Figura 30, se describe con más detalle en qué consiste el proceso de visión artificial:

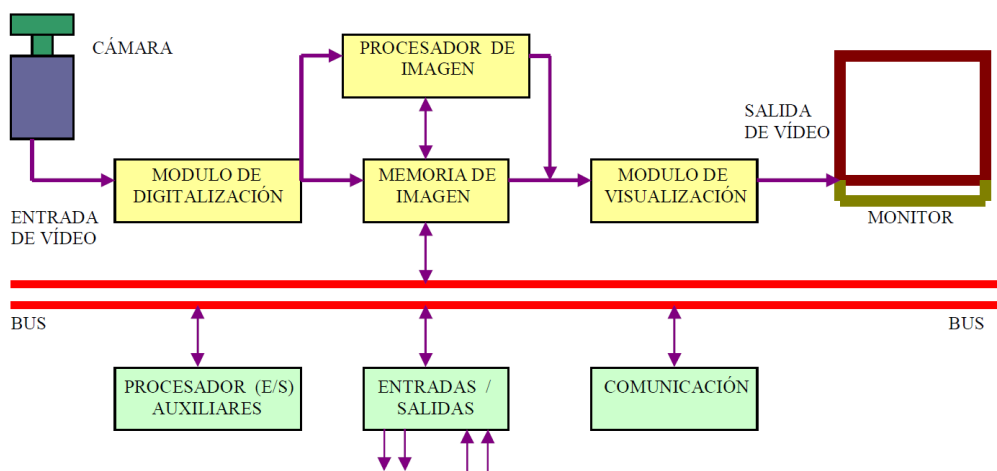


Figura 30: Diagrama de bloques proceso de Visión Artificial
Fuente: (ETITUDELA, 2016)

- Módulo de digitalización: Transformación de una señal analógica a digital (adquisición por una cámara).
- Memoria de imagen: Almacenamiento de señales correspondientes al módulo de digitalización.
- Módulo de visualización: Transformación de una señal digital recopilada en memoria, en una señal de video analógica para apreciarla a través de un ordenador.
- Procesador de imagen: Interpretación de imágenes capturadas por una cámara.
- Módulo entrada/salida: Suministra la entrada de sincronización de captura de imágenes y las salidas de control.
- Comunicaciones: I/O, Ethernet, RS232, Bluetooth, etc.

2.3.2. **Detección de colores (segmentación)**

Para poder obtener una aplicación que sea capaz de detectar y seguir un objeto por un color determinado de manera robusta, puede resultar muy complejo debido a la ausencia de un controlador que permita estabilizar las condiciones de iluminación en nuestro espacio de trabajo.

Seguido de la solución del problema de contraste_ brillo de la imagen, mediante la implementación de un algoritmo de segmentación basado en el color, estableciendo un patrón de histograma en Hue y aplicaciones de saturación y luminancia (HSV).

El primer paso para la detección es la segmentación de una imagen seguido del aislamiento de todos los espacios de píxeles candidatos a ser el objeto a seguir. Dicha segmentación se llevará a cabo al establecer una correspondencia del espacio de píxeles antes mencionados con esquemas previamente entrenados.

2.3.2.1. **Conversión de escala de colores**

Una vez capturada la imagen para poder comenzar con el pre procesamiento de la misma por medio de Open CV. Se puede recordar que la captura de video por defecto es en escala de color RGB. Por tanto para tener una mayor robustez en la visión artificial frente a los cambios de luz y eliminación de sombra, es recomendable la conversión a un modelo de color HSV (valor, matiz, saturación).

Dicho modelo se representa usualmente como se muestra en la figura 31. En donde podemos observar los distintos componentes del mismo.

- Hue (Matiz): ángulo que representa el matiz entre 0 y 360°. Por tanto en Open CV al tratar una imagen de 8 bits aplica una conversión: $H \rightarrow \frac{H}{2}$ es decir (360 \rightarrow 180).
- Saturation (Saturación): nivel de saturación de color entre 0 y 1 es decir la distancia al eje de blanco-negro, en donde 0 representa sin saturación (blanco) hasta 1 toda su intensidad (negro). Sus valores varían entre 0 y 100%. En Open CV se muestra dichos valores en una conversión de valores enteros entre 0 y 255.
- Value (Valor): altura en el eje blanco-negro. Sus valores varían entre 0 y 100%, en donde 0 representa el color negro (vértice del cono). En Open CV se muestran dichos valores en una conversión de valores enteros de 0 a 255.

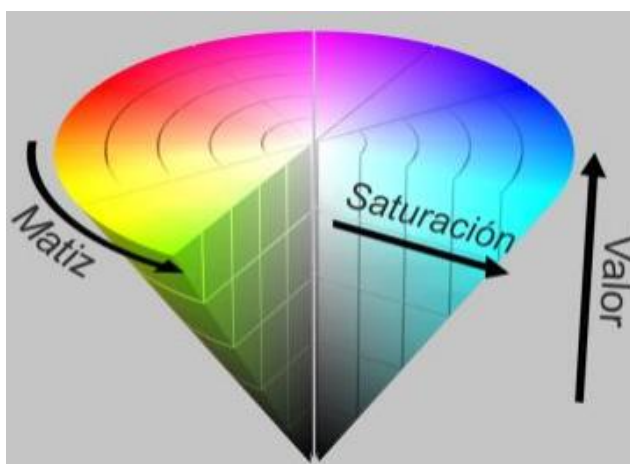


Figura 31: Representación gráfica del modelo de color HSV
Fuente: (González, 2016)

2.3.2.2. Operaciones morfológicas

Para realizar la segmentación de una imagen capturada, por medio de la conversión de la misma a una imagen binaria en función de parámetros que se le asigne. Dicha transformación se basa en que valor del pixel analizado cuando sea mayor a un cierto umbral, se le asignará el color blanco caso contrario se le asignará el color negro. Obteniendo como beneficios la separación del objeto a reconocer de su fondo. La función que puede brindar dicho resultado en Open CV es `inRange`. Esta función se aplica a los tres canales de entrada y la función matemática que se aplica es la que se describe a continuación:

$$imgBin = \min H \leq imgHSV_0 \leq \max H \ \& \ \min S \leq imgHSV_1 \leq \max S \ \& \ \min V \leq imgHSV_2 \leq \max V \quad (2.1)$$

Para poder llevar a cabo esta operación se debe realizar una interfaz gráfica para el usuario, donde mediante Trackbars se pueda abrir los tres canales cada uno con un valor máx y min. Le permitirá modificar los parámetros de la función `inRange` (matiz, saturación, valor). Un ejemplo de dicha interfaz para el usuario podemos apreciar en la figura 32.

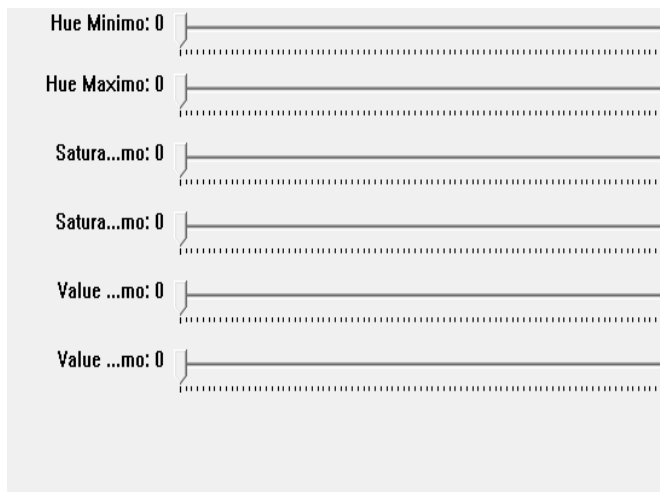


Figura 32: Interfaz gráfica para la detección de un color
Fuente: (González, 2016)

2.3.3. Reconocimiento de contornos

Es una técnica muy útil para la extracción de bordes de imágenes sin olvidar que un borde puede definir una frontera entre dos regiones cuyos niveles de grises pueden resultar significativos para diversas aplicaciones como por ejemplo la detección de fallas en la imprenta en un proceso de etiquetado.

Para el reconocimiento de contornos es necesario el uso de un gradiente por medio del cual se detecta todas las posibles direcciones de un pixel.

$$\overline{gradl} = \left(\frac{dl}{dx}, \frac{dl}{dy} \right) \quad (2.2)$$

$$|gradl| = \sqrt{\left(\frac{dl}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dl}{dy} \right)^2} \quad (2.3)$$

En la práctica se aplica filtros o una máscara a una imagen determinada, las mismas que actúan de manera que van barriendo cada pixel de una imagen.

Un filtro muy utilizado para el reconocimiento de contornos es CANNY, el cual utiliza para dicha operación el empleo de máscaras de convolución, basados en la primera derivada.

Dicho algoritmo de detección de contornos y bordes se basa en tres criterios importantes:

- **Detección:** Evita la eliminación de bordes importantes y la no obtención de bordes falsos.
- **Localización:** Delimita que la distancia entre la posición real y la que se detectó del borde sea mínima.
- **Respuesta:** Integra todos las respuestas posibles que corresponde a un único borde.

Y por último este filtro se ejecuta en tres pasos que son detallados a continuación:

- **Obtención del gradiente:** Calcular la orientación y magnitud del vector del gradiente en cada pixel. Para la obtención del mismo se aplica un filtro gaussiano en la imagen, con ello conseguimos suavizar y eliminar ruido.
- **Supresión no máxima:** Se alcanza el adelgazamiento del ancho de los bordes, recopilados por el gradiente hasta colocarlos en un pixel de ancho.
- **Histéresis de umbral:** Este procedimiento consiste en la aplicación de una función de histéresis en dos umbrales para minimizar la probabilidad de aparición de contornos falsos.



Figura 33: Contornos filtro CANNY
Fuente: (Roberto, 2014)

Sin olvidar que posterior a la obtención de una imagen binaria, en donde blanco representa el objeto a seguir y el resto de la imagen en color negro como podemos apreciar en la figura 33 cuyo objetivo de la aplicación de contornos es el reconocimiento y diferenciación del número de la placa entre varios autos.

Se puede creer que ahí la aplicación de una función que siga el objeto blanco en el fondo negro de dicha imagen binaria sería la solución, pero el problema surge cuando la imagen se encuentra en movimiento. Para ello Open CV cuenta con una función llamada `findContours`, la misma que nos proporciona excelentes resultados en forma cualitativa y cantidad de datos a transformarlos para el seguimiento de un objeto. Dicha función cuenta con los siguientes parámetros:

```
void cv::findContours (InputOutputArray image, OutputArrayOfArrays contours, OutputArray hierarchy, int mode, int method)
```

- **Image:** imagen de entrada (binaria) la cual esta aplicará el filtro CANNY para posteriormente realizar la detección de contornos, que en este caso sería una de las tres figuras geométricas básicas (círculo, triángulo y cuadrado).
- **Contours:** Un vector de contornos, en donde cada vector representa un vector de puntos.
- **Hierarchy:** Contiene la topología de la imagen es decir como es la interacción de los contornos entre sí. Además contiene número de contornos detectados y elementos.
- **Mode:** Define el modo de recuperación de contornos permitiéndonos eliminar relaciones de jerarquía o establecer relaciones para la detección de contornos externos. En este caso se utilizará la operación en el modo “RETR_EXTERNAL” que solo nos permite el reconocimiento de contornos externos.
- **Method:** Aproximación de contornos, el cual posee varios modos de trabajo como por ejemplo: no realizar la aproximación y almacenar todos los puntos de un contorno, llevar a cabo una aproximación simple vertical y horizontalmente comprimiendo para disminuir los puntos del contorno o aplicar algoritmos muy complejos. En este caso utilizaremos el modo “CHAIN_APPROX_SIMPLE” ya que nos permite obtener resultados efectivos y la menor cantidad de puntos de un contorno. Lo que nos facilita todos los cálculos que debe realizar el procesador para la detección de contornos varios.

2.4. Ventajas y desventajas de la Robótica Colaborativa

2.4.1. Ventajas

La principal ventaja que posee la robótica colaborativa es mejorar el rendimiento de varios robots para cumplir un objetivo en común, gracias al ahorro de recursos que necesita cada robot como lo es el grado de complejidad que posea, así como el tiempo empleado en realizar la tarea.

La tolerancia a fallas se reduce ya que si existe un fallo por parte de un robot puede ser subsanado por el resto del equipo robótico.

2.4.2. Desventajas

El principal inconveniente encontrado en estos sistemas colaborativos es la dependencia de una buena comunicación entre cada robot, ya que se necesita un gran velocidad de procesamiento de información a tiempo real y que esos datos sean enviados a todos, lo más pronto posible para evitar choques y pérdida de información lo que con lleva al aumento en el costo de diseño de cada robot.

La incertidumbre que existe entre los robots en el momento de repetir una tarea que ya se ha realizado anteriormente por otro miembro del equipo esto causa que el sistema pierda eficacia.

La interferencia entre robots depende del nivel de programación usado en el sistema y la retroalimentación que posean cada uno, como la información obtenida por sensores esto con lleva a un aumento en el precio y tamaño de cada robot.

2.5. Resumen

- La robótica colaborativa se define de la mejor manera como: la interacción entre varios miembros de un grupo de robots, donde la solución a un problema está basado en la inteligencia colaborativa, es decir la solución surge del comportamiento grupal, dicha inteligencia hace al sistema robusto. Al existir varios individuos, las tareas pueden ser repartidas y en caso de que cualquier miembro del grupo no pueda finalizar su tarea encomendada, otro individuo lo hará por él.
- Los sistemas de control de la robótica cooperativa establecen dos tipos de arquitecturas, siendo la centralizada la que cumple con el objetivo del presente proyecto. Dicha arquitectura cuenta con varios robots, los cuales dependen de una unidad central, la

misma que envía las órdenes necesarias a cada uno de sus miembros para realizar una función de la manera más adecuada y óptima.

- La visión artificial para el reconocimiento de figuras geométricas se basa en la detección de contornos, la misma que extrae los bordes de una imagen sin olvidar que un borde puede definir una frontera entre dos regiones cuyos niveles de grises pueden resultar significativos para diversas aplicaciones.
- La detección y seguimiento de un objeto por un color determinado de manera robusta, puede resultar muy complejo debido a la ausencia de un controlador que nos permita estabilizar las condiciones de iluminación en nuestro espacio de trabajo, lo cual podemos solucionarlo mediante el modelo color HSV (matiz, saturación, valor).

Capítulo 3

Metodología y diseño

En el presente capítulo se describe el diseño de robots con trabajo colaborativo para la generación de formas geométricas básicas. Donde el inicio, se centra en el establecimiento de las necesidades de los usuarios así como de su diseñador. Posteriormente se define las especificaciones que satisfacen las necesidades, para poder definir el diseño de los robots. Se analizan los diferentes módulos que involucra la toma de decisión del concepto definitivo del robot, así como sus diferentes alternativas y con esto valorar la más conveniente. Finalmente se realiza la definición del diseño para dar paso a la fabricación e implementación seguido por la corrección de posibles fallos y así poder mejorar el concepto final del producto.

3.1. Definición de necesidades

“El proceso de identificar las necesidades del cliente es parte integral del proceso de desarrollo del producto y está más estrechamente relacionado con la generación de conceptos, selección, la comparación contra productos de la competencia y el establecimiento de las especificaciones del producto”. (ULRICH & EPPINGER, 2013)

En la Tabla 1 se detalla las necesidades del usuario y la importancia que tienen en el producto final.

Tabla 1:
Detalle de necesidades y su importancia relativa

Núm.	Concepto general	Necesidad	Importancia
1	Aplicación	Posicionamiento preciso en puntos especificados	5
2		Seguimiento de una trayectoria determinada	5
3	Manufactura	Estructura estable	4
4		Estructura estética	2
5	Software	Control robusto	4
6		Amigable al usuario	3
7	Costo	Costo accesible	3

Nota: La importancia tiene un rango de 1 (menos importante) a 5 (muy importante)

3.2. Especificaciones del concepto

Para poder tener una guía clara de cómo diseñar hasta llegar a la fabricación de un producto es necesario establecer un conjunto de especificaciones.

Las mismas que mediante métricas (véase Tabla 2) reflejan el grado al cual el producto satisface las necesidades del usuario de una forma directa. Por ello es esencial la relación entre la necesidad y una métrica.

Tabla 2:
Lista de métricas

N. Métrica	N. Necesidad	Métrica	Imp.	Unidades
1	1,2	Precisión que tiene a girar	5	Grados
2	1,2	Error entre punto real y punto requerido	5	Mm
3	3	Prueba de choque	4	J
4	3	Ciclos de carga antes de daño	4	Ciclos
5	4	Atractivo superficial	2	Subj.
6	1,2,5,6,7	Software del controlador	4	Open source
7	3,4,7	Tipo de material	3	Lista A
8	4,7	Proceso de fabricación	3	Lista B

Nota: Se le dio una medida Subj. (Subjetiva) a métricas que no pueden ser medidas de manera numérica.

En la tabla 3 se puede observar una comparativa con los diferentes precios de materiales comerciales. Que se podrían usar en la fabricación de nuestra plataforma móvil. En la tabla 4 indicamos precios en costo de maquinado de los materiales comerciales antes mencionados.

Tabla 3:
LISTA A.- Materiales comerciales y costo por m².

LISTA A – MATERIALES COMERCIALES Y COSTO (m ²)	
MDF	10 dólares
Acrílico	30 dólares
Plancha metálica (tol)	45 dólares

Tabla 4:
LISTA B.- Procesos de maquinado y costo por minuto

LISTA B – PROCESOS DE MANUFACTURA Y COSTO (min)	
Corte láser	0,40 MDF, 0,80 acrílico 2,00 tol
Impresión en 3D	8,5 dólares/hora
Corte plasma(tol)	15,00 dólares/hora

La matriz necesidad-métrica (véase Tabla 5), se puede observar que el rendimiento relativo a la métrica influirá en qué grado el producto satisface las necesidades del usuario. Esta matriz es un elemento clave de la casa de la calidad (House of Quality), técnica grafica que emplea el despliegue de la función de la calidad o QFD. (Clausing, 2003)

Tabla 5:
Matriz de necesidades-métricas

Necesidades		Métricas	Precisión al girar	Error entre el punto real y el requerido	Prueba de choque	Ciclos de carga antes de daño	Atractivo superficial	Software del controlador	Tipo de material	Proceso de fabricación
1	Posicionamiento preciso en puntos especificados		•	•				•		
2	Seguimiento de una trayectoria determinada		•	•				•		
3	Estructura estable				•	•			•	
4	Estructura estética						•		•	•
5	Control robusto							•		
6	Amigable al usuario							•		
7	Costo accesible							•	•	•

3.3. Definición del concepto

En el libro de diseño y desarrollo de productos de Karl Ulrich y Steven Eppinger, el concepto de un producto se define como una descripción de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto (ULRICH & EPPINGER, 2013, pág. 120).

3.3.1. Generación de concepto

El proceso de generación de conceptos parte del conjunto de necesidades del cliente descritas en el punto 3.1, las cuales con llevan a especificaciones de objetivos descritas en el punto 3.2, permite dividir al producto en módulos, los cuales son una representación de diferentes funciones generales del producto teniendo en cuenta cuales son más importantes para el funcionamiento del mismo.

Para este proyecto se ha decidido separarlo en tres sistemas y en diferentes módulos como se detallan en la Figura 34.

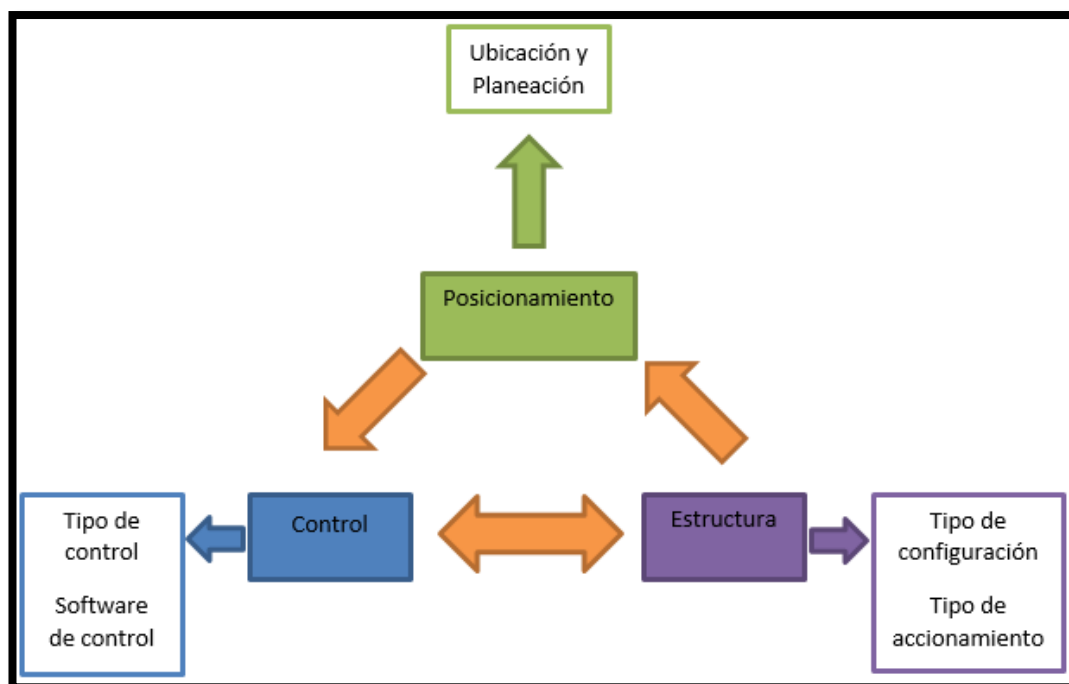


Figura 34: Esquema general del proyecto, sistemas generales y módulos

En la figura 34, se puede observar un esquema representativo de los principales sistemas y módulos en los que se ha dividido el proyecto para tener una mejor comprensión. Como se puede observar existen tres sistemas que son: Control, Ubicación y orientación y Robot móvil, que están relacionados de la forma:

El sistema de posicionamiento, obtiene datos referentes a la ubicación espacial de los robots y su espacio de trabajo, envía esta información al sistema de control.

La estructura que forma el robot móvil, recibe información del sistema de control y envía información referente a su entorno a este mismo sistema (obstáculos).

El sistema de control, está encargado de recibir información procedente de los otros dos sistemas, procesa la información y envía la que sea necesaria a los robots (posicionamiento, direccionamiento y movimiento).

En la Tabla 6, se puede observar los módulos que comprenden el presente proyecto.

Tabla 6:
Sistemas y Módulos del proyecto

Número	Sistema	Módulo
1	Estructura	Tipo de configuración
2		Tipo de accionamiento
3	Posicionamiento	Ubicación y planeación
4	Control	Tipo de control
5		Software de control

3.3.2. Módulo 1: Estructura mecánica

3.3.2.1. Subsistema 1: Tipo de configuración

a. Ackerman

Este diseño corresponde al de los vehículos convencionales de 4 ruedas como los automóviles y consiste en 2 ruedas delanteras directrices y 2 ruedas traseras motrices (R. Silva Ortigoza et al., 2007).

El centro de rotación de las ruedas traseras coincide, ya que son ruedas paralelas. El de las ruedas delanteras también coincide, siempre que se desplace hacia adelante o hacia atrás, pero en el momento de dar el giro, se debe buscar que el centro instantáneo de rotación de las cuatro ruedas coincida, de modo que el ángulo de giro de la rueda interna es ligeramente mayor que el de la rueda externa, véase Figura 35.

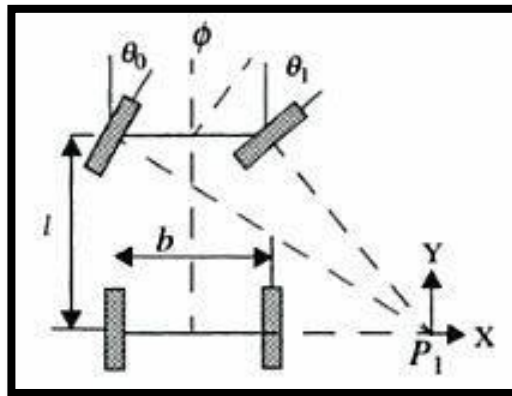


Figura 35: Configuración Ackerman
Fuente: (Molina & Rodríguez, 2014)

Ventajas

- Buena estabilidad

Desventajas

- Posee una estructura mecánica complicada

b. Triciclo

Esta configuración posee una rueda delantera de direccionamiento, que a la vez sirve para la tracción, y dos ruedas paralelas traseras pasivas cuya finalidad es darle estabilidad a la plataforma (R. Silva Ortigoza et al., 2007), véase Figura 36.

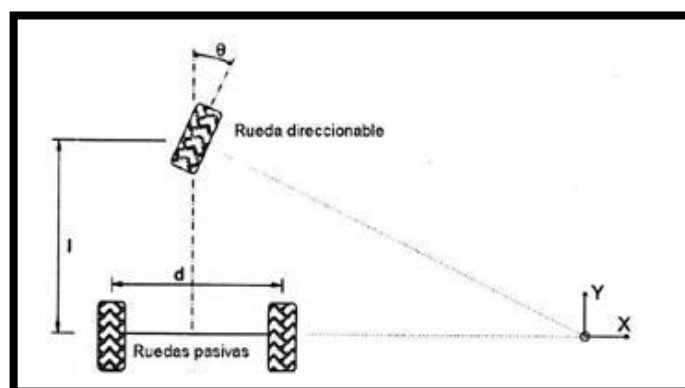


Figura 36: Configuración Triciclo
Fuente: (Molina & Rodríguez, 2014)

Ventajas

- Diseño mecánico simple

- Buena estabilidad
- Buen posicionamiento

Desventajas

- Dificultad al girar
- Usada en vehículos que no giren continuamente

c. Síncrono

Este diseño posee tres ruedas siendo directrices como motrices. Se desplaza gracias a la acción simultánea de todas las ruedas, las cuales giran de forma síncrona. Las ruedas están dispuestas de tal manera, que todas apuntan en la misma dirección, véase Figura 37.

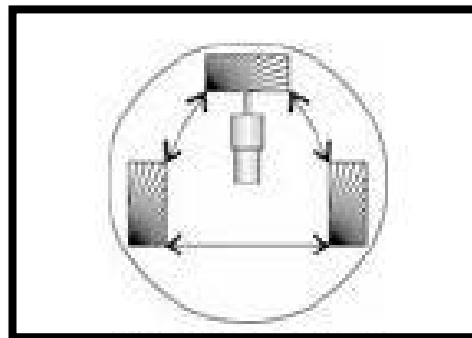


Figura 37: Configuración Síncrono
Fuente: (Molina & Rodríguez, 2014)

Ventajas

- Precisión al girar
- Buena estabilidad

Desventajas

- Para girar necesita la rotación de todas sus ruedas
- La sincronización depende del tipo de motor a usarse

d. Diferencial

En esta configuración existen dos ruedas motrices ubicadas perpendicularmente a la dirección del robot (Cárdenas Calle et al., 2007), y una o dos ruedas de castor o de bola, con el objetivo de brindar estabilidad al sistema, como se muestra en la Figura 38. Cada rueda es controlada por un motor, por lo que el giro del robot está determinado por la diferencia de las velocidades de las mismas (Cárdenas Calle et al., 2007; R. Silva Ortigoza et al., 2007).

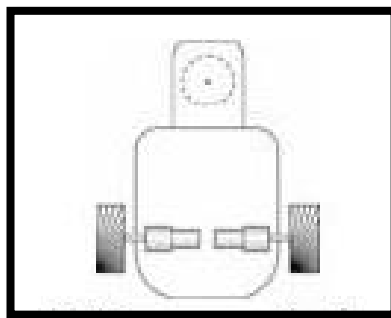


Figura 38: Configuración Diferencial
Fuente: (Molina & Rodríguez, 2014)

Ventajas

- Tiene un diseño simple
- Es aplicable a todos los robots con ruedas
- Tiene un diseño muy estable

Desventajas

- El giro depende de la sincronización de las dos ruedas

e. Omnidireccional

Corresponde a una configuración capaz de moverse en cualquier dirección sin importar la orientación (V. F. Muñoz Martínez et al., n.d.). Las ruedas de esta configuración son ruedas estándar, dotadas de una corona de rodillos, estos permiten rodar y desplazarse alrededor de su eje, ya que facilitan que el componente de la fuerza ejercida para su desplazamiento, no sea necesariamente nulo (Cárdenas Calle et al., 2007; Naiara Escudero Sánchez et al., n.d.), véase Figura 39.

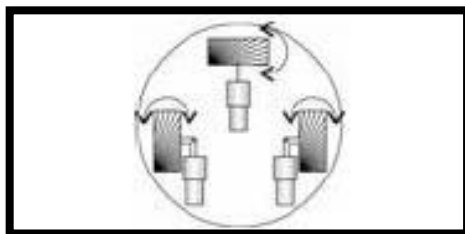


Figura 39: Configuración Omnidireccional
Fuente: (Molina & Rodríguez, 2014)

Ventajas

- Posee autonomía en cada rueda lo que le permite mayor exactitud en su posicionamiento

- Buena estabilidad

Desventajas

- Ocupa mayor cantidad de energía

3.3.2.2. Subsistema 2: Tipo de accionamiento

El módulo que hace referencia al tipo de actuadores eléctricos caracterizados por la precisión en sus movimientos así como la facilidad de su control.

Al momento de seleccionar el tipo de actuador más adecuado es aconsejable considerar las siguientes características:

- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Costo

Con ello se puede establecer tres tipos de actuadores eléctricos:

- Motores de corriente continua (DC). Servomotores
- Motores paso a paso
- Motores de corriente alterna (AC)

a. Motores de corriente continua (DC). Servomotores

Un servo es un dispositivo que puede adoptar posiciones angulares variadas al enviar una señal codificada. Si la señal codificada existe a la entrada, la posición angular de la reducción de engranes se mantendrá caso contrario esa posición se modificara.

Los servos son útiles para el posicionamiento de superficies de control a través del movimiento de pequeños ascensores y timones, palancas. También son usados en el radio control y en la robótica.

Ventajas

- Lo servomotores poseen la capacidad de sobrecarga de trabajo, por tanto su trabajo es tres veces más rápido y potente que su torque y velocidad.
- Alta precisión en sus movimientos, y controlabilidad.
- Alta capacidad de torque en una estructura física reducida.
- El porcentaje de voltaje aplicado a un servomotor es proporcional a la distancia que se desea desplazar.

Desventajas

- No se puede operar directamente necesita obligatoriamente servo driver o controlador que opera PWM.
- Costo elevado dependiendo de la aplicación.
- Para el control de secuencias de posiciones, se requiere un control robusto para que el sistema resulte eficiente.

b. Motores paso a paso

Dispositivos electromecánicos que transforman los impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos.

Estos motores son utilizados por lo general en mediciones y aplicaciones de control. Como por ejemplo en bombas volumétricas, impresoras, máquinas de control numérico (CNC), entre otras.

Ventajas

- Este tipo de motor posee un torque máximo cuando sus bobinas están energizadas, así como una respuesta rápida y excelente ante el arranque, parada y reversa.
- El motor permite un control de lazo abierto por tanto el control es más simple y económico debido a que responde a pulsos de entradas digitales.
- Posee un gran rango de velocidades de rotación por tanto es proporcional a la frecuencia de los pulsos de entrada.

Desventajas

- La operación a altas velocidades es complicado.

- Sobrecalentarse a altas velocidades.
- Riesgo de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto.
- Sin un control adecuado puede ocurrir un fenómeno de resonancia.

c. Motores de corriente alterna (AC)

Por la dificultad de su control no han tenido una aplicación fuerte en los últimos años en el campo de la robótica. Por tanto las mejores aplicaciones se han visto reflejadas en máquinas sincrónicas siendo un adversario de los motores de corriente continua. Por tres razones importantes que se muestran a continuación:

- Los motores sincrónicos no poseen escobillas
- Una gran capacidad de control con el uso de la microelectrónica.
- Varía la frecuencia por el uso de convertidores estáticos con precisión y facilidad.

Existen dos tipos fundamentales de motores de corriente alterna:

- Motores asíncronos
- Motores síncronos

Motores asíncronos

Motores eléctricos sencillos y robustos. La frecuencia de la corriente alterna determina la velocidad de rotación a la cual rota el campo magnético del estator. El rotor sigue dicho campo, girando mucho más despacio y dicha diferencia de velocidades se denomina deslizamiento.

Motores síncronos

Este tipo de motor opera exactamente a la misma velocidad que le campo del estator, sin deslizamiento. En estos motores la velocidad de giro es dependiente de la frecuencia de tensión. Para poder cambiar la precisión, se realiza mediante un convertidor de frecuencia el control de velocidad.

Ventajas

- Su implementación conjuntamente con un control robusto puede llegar a obtener grandes réditos a nivel de robótica industrial.
- Pueden trabajar a altas potencias.
- El desgaste mecánico es mínimo así como el mantenimiento.

Desventajas

- Alto costo de implementación.
- Debido a que es incapaz de mantener el torque cuando está en reposo requiere la construcción de una caja de reducción.
- El control resulta complejo para este tipo de actuadores.

3.3.3. Módulo 2: Posicionamiento

3.3.3.1. Subsistema 1: Ubicación y planeación

Este módulo permite determinar la manera más eficiente para obtener puntos específicos, donde se encuentra el robot y hacia donde tiene que ir, los sistemas pueden ser: visión artificial, GPS y por sensores.

a. Visión Artificial

Esta manera permite obtener, examinar, resolver y entender las diversas imágenes de nuestro entorno con el objetivo de transformar dicha información numérica para que puedan ser analizadas por un ordenador.

Ventajas

- Permite tener información precisa
- Involucra todo el entorno de trabajo
- Es muy aplicable a problemas de ubicación espacial

Desventajas

- Alto gasto computacional
- Depende de la definición de la cámara usada
- Depende de la capacidad de envío de imágenes para que sea optimo

b. GPS

Esta manera permite determinar en toda la Tierra la posición de un objeto con una precisión de hasta centímetros, aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión.

Ventajas

- Permite tener con precisión la ubicación y posicionamiento de un robot

- Su implementación es sencilla
- Proporciona información a tiempo real

Desventajas

- La precisión depende del modelo de GPS usado
- Su implementación es costosa
- No puede identificar obstáculos

c. Sensores

Esta manera es basada en la implementación de sensores que obtengan información de su exterior y procesen la misma para poder tomar una decisión.

Ventajas

- El uso de sensores básicos puede dar buena información del entorno
- Existencia de gran número de sensores de acuerdo a una aplicación determinada.

Desventajas

- Necesidad de varios sensores para obtener buena información

Alto consumo computacional dependiendo del número de sensores

3.3.4. Módulo 3: Control

3.3.4.1. Subsistema 1: Tipo de control

El tipo de control es una de las partes más importante a analizar para el presente proyecto y estos se dividen en: centralizado y distribuido.

a. Control Centralizado

Este tipo de control se basa en la comunicación entre módulos robóticos con un computador central y este resuelve todos los problemas de movimiento y re-configuración. Al utilizar este tipo de control se pueden implementar algoritmos muy elaborados pero se limita la autonomía de los módulos, por esta razón se prefieren formas de control descentralizadas.

Ventajas:

- Se puede implementar algoritmos muy elaborados.

- Resuelve problemas de movimiento y re-configuración

Desventajas:

- Limita la autonomía de los módulos robóticos
- Se emplea un gran coste computacional

b. Control Distribuido

En este tipo de control cada módulo robótico posee su propio algoritmo de control y se comunica con los demás para realizar las tareas encomendadas. Es la forma más usada de control ya que evita problemas como el embotellamiento en las comunicaciones y brinda mayor autonomía a los módulos.

Ventajas:

- Evita congestión en el envío de datos lo que hace al sistema más dinámico y rápido
- Brinda mejor autonomía a cada módulo robótico

3.3.4.2. Subsistema 2: Software de control

Un software es un conjunto de programas para crear una interfaz gráfica destinada al usuario. Para el presente proyecto es de suma importancia, la selección del software que realizara todo el control del sistema.

El software de un sistema está integrado por un conjunto de programas que tienen como finalidad optimizar recursos y facilitar el uso del sistema.

Los programas de control están desarrollados para que puedan facilitar las tareas múltiples al computador con éxito, ya sea una modalidad de trabajo como mono programación, multiprogramación, etc.

El programa Open CV es una biblioteca libre de visión artificial desarrollada por Intel. Con múltiples aplicaciones que van desde un control de procesos para el reconocimiento de objetos hasta sistemas de seguridad complementando con la detección de movimiento.

Open CV es una plataforma dinámica, existente en varias versiones para sistemas operativos como Windows, GNU/Linux y MacOS X. Posee 500 funciones variadas las cuales abarcan ampliamente el campo de la visión artificial, como es el reconocimiento de objetos, facial, de movimiento, calibración de cámaras, visión robótica y estérea.

La multiplataforma busca proporcionar al usuario un entorno amigable y de fácil uso, para ello su programación acoge el código C y C ++ sin dejar de lado el aprovechamiento de las capacidades de procesadores multinúcleo.

Ventajas:

- Proporciona un manejo de imágenes y análisis tanto de movimiento como seguimiento de objetos.
- Permite el reconocimiento de objetos, así como el manejo de estructuras básicas.
- Permite además la construcción de interfaces graficas de usuario (GUI).

3.4. Evaluación de conceptos

La evaluación de conceptos se lleva a cabo en base a las necesidades del usuario y los criterios del diseñador siempre comparando puntos fuertes y débiles de los módulos analizados a detalle en la definición del concepto.

La técnica de decisión para la selección de conceptos en este caso se utilizará el método ordinal corregido de los criterios ponderados.

3.4.1. Método ordinal corregido de los criterios ponderados

En la etapa de diseño conceptual para decidir entre diversas soluciones en la mayor parte de veces, solo se necesita conocer el orden de preferencia de la evaluación global.

Razón por la cual se recomienda el método ordinal corregido de criterios ponderados, que no requiere evaluar los parámetros de cada propiedad, permitiendo obtener resultados globales significativos.

El cual se basa en tablas donde cada criterio o solución, para poder determinarlo se confronta criterios y se asigna los siguientes valores:

- 1: Si es el criterio de las filas es superior o mejor que el de las columnas.
- 0.5: Si el criterio de las filas es equivalente o igual a las columnas.
- 0: Si el criterio de las filas es inferior o peor que el de las columnas.

Después para cada criterio, se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios al que se aumenta una unidad para evitar que el criterio menos favorable tenga una valoración nula; luego, en otra columna se calcula los valores ponderados para cada criterio.

Por último, la evaluación total para cada solución proviene de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

3.4.2. Módulo 1: Estructura mecánica

3.4.2.1. Subsistema 1: Tipo de configuración

En la tabla 7 se puede observar la ponderación de criterios de evaluación para el tipo de configuración de la estructura mecánica. Sin olvidar que el criterio que obtenga el valor más alto, servirá como precedente en la selección del concepto. A continuación se puede observar de la tabla 8 a la tabla 11 la evaluación de cada criterio, hasta la obtención de la solución que se acople de la mejor manera al requerimiento del módulo 1.

Tabla 7:
Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de configuración

Criterio	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	$\sum+1$	Ponderación
Aplicación	-	0	1	1	3	0.3
Manufactura	1	-	1	0	3	0.3
Software	0	0	-	0	1	0.1
Costo	0	1	1	-	3	0.3
Suma					10	1

Solución A: Diferencial

Solución B: Triciclo

Solución C: Síncrono

Solución D: Ackerman

Solución E: Omnidireccional

Tabla 8:
Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\sum+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	0.5	1	4	0.27
Solución B	0.5	-	1	0.5	0	3	0.2
Solución C	0	0	-	0.5	0.5	2	0.13
Solución D	0.5	0.5	0.5	-	0.5	3	0.2
Solución E	0	1	0.5	0.5	-	3	0.2
Suma						15	1

Tabla 9:
Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	1	1	4.5	0.3
Solución B	0.5	-	0.5	1	0	3	0.2
Solución C	0	0.5	-	0.5	0.5	2.5	0.17
Solución D	0	0	0.5	-	0	1.5	0.1
Solución E	0	1	0.5	1	-	3.5	0.23
					Suma	15	1

Tabla 10:
Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1

Software	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0.5	1	3.5	0.23
Solución B	1	-	0	0	0.5	2.5	0.17
Solución C	0	1	-	0	1	3	0.2
Solución D	0.5	1	1	-	0.5	4	0.27
Solución E	1	0.5	0	1	-	3.5	0.23
					Suma	15	1

Tabla 11:
Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 1

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	1	1	4	0.27
Solución B	1	-	0	1	1	4	0.27
Solución C	0	1	-	0	1	3	0.2
Solución D	0	0	1	-	1	3	0.2
Solución E	0	0	0	0	-	1	0.06
					Suma	15	1

De acuerdo a los resultados que se muestra en la tabla 12. La solución del tipo de configuración a desarrollar es la opción A con una ventaja considerable. Dicha configuración diferencial es la más sencilla en la construcción y factibilidad de control.

Tabla 12:
Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 1

	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	Σ	Orden de Selección
Solución A	0.08	0.09	0.02	0.08	0.27	1
Solución B	0.06	0.06	0.02	0.08	0.22	2
Solución C	0.04	0.05	0.02	0.06	0.17	4
Solución D	0.06	0.03	0.03	0.06	0.18	3
Solución E	0.06	0.07	0.02	0.02	0.17	5

3.4.2.2. Subsistema 2: Tipo de Accionamiento

En la tabla 13 se puede observar la ponderación de criterios de evaluación para el tipo de accionamiento de las llantas laterales de la plataforma diferencial. Sin olvidar que el criterio que obtenga el valor más alto, servirá como precedente en la selección del concepto. A continuación se puede observar de la tabla 14 a la tabla 17 la evaluación de cada criterio, hasta la obtención de la solución que se acople de la mejor manera, al requerimiento del módulo 1.

Tabla 13:
Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de accionamiento para la estructura mecánica

Criterio	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Aplicación	-	0.5	0.5	0.5	2.5	0.25
Manufactura	0.5	-	0	1	2.5	0.25
Software	0.5	1	-	0	2.5	0.25
Costo	0.5	0	1	-	2.5	0.25
				Suma	10	1

Solución A: Motor DC

Solución B: Motor paso a paso

Solución C: Motor AC

Solución D: Motor asíncrono

Solución E: Motor síncrono

Tabla 14:
Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	0.5	0.5	4	0.27
Solución B	0	-	1	0.5	0	2.5	0.17
Solución C	0	0	-	0.5	0	1.5	0.1
Solución D	0.5	0.5	0.5	-	1	3.5	0.23
Solución E	0.5	1	1	0	-	3.5	0.23
					Suma	15	1

Tabla 15:
Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	0.5	1	1	4.5	0.3
Solución B	0	-	0.5	0.5	0	2	0.13
Solución C	0.5	0.5	-	0.5	0.5	3	0.2
Solución D	0	0.5	0.5	-	0	2	0.13
Solución E	0	1	0.5	1	-	3.5	0.23
					Suma	15	1

Tabla 16:
Ponderación de software para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1

Software	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	0.5	1	4.5	0.3
Solución B	0	-	0.5	1	0.5	3	0.2
Solución C	0	0.5	-	0	1	2.5	0.17
Solución D	0.5	0	1	-	0.5	3	0.2
Solución E	0	0.5	0	0.5	-	2	0.13
					Suma	15	1

Tabla 17:
Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 2. Módulo 1

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	Solución E	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	0.5	0.5	4	0.27
Solución B	0	-	0	0.5	0.5	2	0.13
Solución C	0	1	-	0	1	3	0.2
Solución D	0.5	0.5	1	-	0.5	3.5	0.23
Solución E	0.5	0.5	0	0.5	-	2.5	0.17
					Suma	15	1

De acuerdo a los resultados que se muestra en la tabla 18. La solución del tipo de accionamiento a desarrollar es la opción A con una ventaja considerable. Dicha accionamiento mediante un motor DC (servomotor de rotación continua) nos brinda la precisión adecuada para el control de la planeación y ubicación de la plataforma móvil.

Tabla 18:
Resumen en la selección de alternativas del subsistema 2. Módulo 1

	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	Σ	Orden de Selección
Solución A	0.07	0.08	0.08	0.08	0.31	1
Solución B	0.04	0.03	0.05	0.05	0.17	4
Solución C	0.03	0.05	0.04	0.04	0.16	5
Solución D	0.06	0.03	0.05	0.05	0.19	2
Solución E	0.06	0.06	0.03	0.03	0.18	3

3.4.3. Módulo 2: Posicionamiento

3.4.3.1. Subsistema 1: Ubicación y planificación

En la tabla 19 se puede observar la ponderación de criterios de evaluación para la ubicación y planeación de la plataforma diferencial. Sin olvidar que el criterio que obtenga el valor más alto, servirá como precedente en la selección del concepto. A continuación se puede observar de la tabla 20 a la tabla 23 la evaluación de cada criterio, hasta la obtención de la solución que se acople de la mejor manera al requerimiento del módulo 2.

Tabla 19:
Ponderación de criterios de evaluación para la ubicación y planificación

Criterio	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Aplicación	-	0	1	1	3	0.3
Manufactura	1	-	0	1	3	0.3
Software	0	1	-	1	3	0.3
Costo	0	0	0	-	1	0.1
				Suma	10	1

Solución A: Visión Artificial

Solución B: GPS

Solución C: Sensores

Tabla 20:
Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2

Aplicación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0	-	0	1	0.16
Solución C	0.5	1	-	2.5	0.42
		Suma		6	1

Tabla 21:
Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.16
		Suma		6	1

Tabla 22:
Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2

Software	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.5
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 23:
Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 2

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0.5
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0	1	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 24:
Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 2

	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	Σ	Orden de Selección
Solución A	0.13	0.13	0.1	0.05	0.41	1
Solución B	0.05	0.13	0.15	0.02	0.35	2
Solución C	0.13	0.05	0.05	0.03	0.24	3

De acuerdo a los resultados que se muestra en la tabla 24. La solución para la ubicación y planeación de la trayectoria a trazar por parte de la plataforma diferencial es la opción B con una ventaja considerable. La misma que se realizará mediante la planeación y ubicación previa, y en conjunto con Open CV se tendrá la retroalimentación de que figura desea el usuario trazar.

3.4.4. Módulo 3: Control

3.4.4.1. Subsistema 1: Tipo de control

En la tabla 25 se puede observar la ponderación de criterios de evaluación para el tipo de control de la plataforma diferencial. Sin olvidar que el criterio que obtenga el valor más alto, servirá como precedente en la selección del concepto. A continuación se puede observar de la tabla 26 a la tabla 28 la evaluación de cada criterio, hasta la obtención de la solución que se acople de la mejor manera al requerimiento del módulo 3.

Tabla 25:
Ponderación de criterios de evaluación para el tipo de control

Criterio	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Aplicación	-	0.5	0	1	2.5	0.25
Manufactura	0.5	-	0.5	1	3	0.3
Software	1	0.5	-	1	3.5	0.35
Costo	0	0	0	-	1	0.1
				Suma	10	1

Solución A: Centralizado

Solución B: Distribuido

Tabla 26:
Ponderación de aplicación para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3

Aplicación	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 27:
Ponderación de manufactura para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3

Manufactura	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1.5	0.5
Solución B	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

Tabla 28:
Ponderación de software para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3

Software	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 29:
Ponderación de costo para las alternativas del subsistema 1. Módulo 3

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

De acuerdo a los resultados que se muestra en la tabla 30. La solución para el tipo de control de las plataformas diferenciales es la opción A con una ventaja considerable. La misma que se realizará ya que el tipo de control se basa en la comunicación entre módulos robóticos con un computador central y este resuelve todos los problemas de movimiento y re-configuración.

Tabla 30:
Resumen en la selección de alternativas del subsistema 1. Módulo 3

	Aplicación	Manufactura	Software	Costo	Σ	Orden de Selección
Solución A	0.17	0.15	0.23	0.03	0,58	1
Solución B	0.08	0.15	0.1	0.07	0,42	2

3.5. Selección de concepto

La selección del concepto se requiere no solo durante el desarrollo del concepto sino en todo lo subsiguiente del proceso de diseño y desarrollo del mismo. Es un proceso de facilitación, que le permite al diseñador la selección del concepto en cada módulo que se realizó la evaluación de conceptos, ayudando a crear y elaborar un registro del proceso de toma de decisiones.

En la tabla 31 se muestra las alternativas seleccionadas. Soluciones que serán implementadas en cada módulo descrito anteriormente.

Tabla 31:
Resumen de selección

	Módulo	Selección
Estructura	Tipo de configuración	Diferencial
	Tipo de accionamiento	Motores DC, Servomotor
Posicionamiento	Ubicación y planeación	Visión artificial
Control	Tipo de control	Centralizado
	Software de control	Open CV

3.6. Módulo 1. Estructura

3.6.1. Diseño Mecánico

La Figura 40, podemos observar el diseño final simulado en software que se pretende obtener en el presente proyecto.

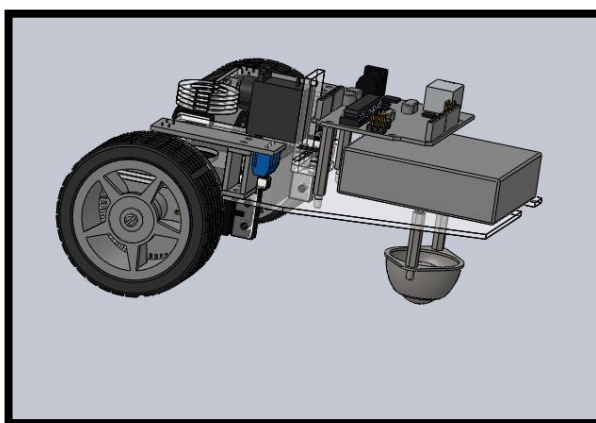


Figura 40: Diseño mecánico final

3.6.1.1. Subsistema 1. Tipo de configuración

Diferencial

En la Figura 41, se muestra las distintas posiciones de las llantas para el movimiento de un robot con configuración diferencial.

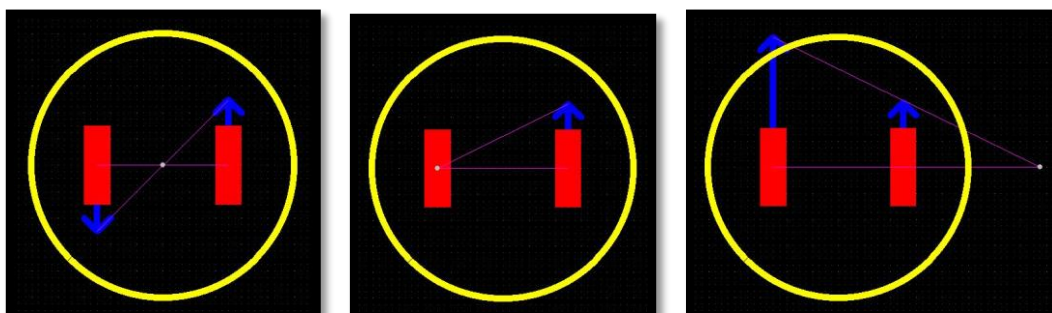


Figura 41: Configuración Diferencial
Fuente: (Molina & Rodriguez, 2014)

El tipo de configuración viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas traseras de la plataforma móvil. Las dos ruedas se encuentran montadas en un eje único y son controladas de manera independiente. Además proporcionan la tracción y direccionamiento del robot, donde el movimiento de las ruedas se realiza alrededor del centro instantáneo de rotación. El sistema puede cambiar de orientación sin necesidad de la traslación y podemos obtener un posicionamiento deseado con trayectorias definidas, por la existencia de diferentes modelos cinemáticos.

La configuración nos proporciona menos problemas en la locomoción del robot, ya que existe la posibilidad de seguir una trayectoria recta y girará sobre sí mismo, trazando curvas para

alcanzar la trayectoria deseada. Para solucionar un problema importante sobre el equilibrio del robot móvil adicionamos una rueda loca, la misma que servirá como un apoyo adicional a las ruedas laterales. Y por último consideramos que para que el robot pueda moverse en línea recta las dos ruedas laterales deben girar a la misma velocidad. Se puede apreciar en la figura 41, que el robot puede girar sobre su propio eje (el punto medio entre las ruedas de tracción) lo que le da una mejor respuesta ante curvas cerradas.

3.6.1.2. Subsistema 2. Tipo de accionamiento

Se escogió como tipo de actuador a un servomotor de corriente continua, siendo la alternativa más conveniente en la selección del concepto. El cual contribuirá en la dirección del manipulador, así como en la potencia y tracción de las dos llantas traseras. Por tanto se investigo acerca de las características de potencia y controlabilidad de servomotores que cumplan con los requerimientos del diseño.

Para la selección de los motores nos enfocamos en los mini servos SG90 TowerPro los cuales tiene una alta calidad, engranaje de nylon, gran torque, pequeño en tamaño y peso ligero. Permitiéndonos que el efector final implementado conjuntamente con un marcador trazar la trayectoria que seguirá cada robot para la formación de figuras geométricas básicas.

La Figura 42, nos muestra el servo motor a usarse en el efector final del robot



Figura 42: TermoPro Mini servo SG90
Fuente: (Hobby Model, 2016)

El servomotor cuenta con las siguientes especificaciones mostradas en la tabla 32.

Tabla 32:
Especificaciones técnicas mini servo SG90

Especificación	Magnitud
Marca	TowerPro
Modelo	SG90
Dimensiones	22 X 11.8 X 31 mm
Peso	9 g
Voltaje de funcionamiento	3.0 – 7.2V
Velocidad de funcionamiento	0.10 sec/60° a 4.8V
Torque	1.8 kgf-cm a 4.8V
Temperatura de funcionamiento	30 °C ~ 60 °C
Ángulo de rotación	180°
Ancho de pulso	500-2400 µs

Adicionalmente escogimos un Parallax (Futaba S148) Continuous Rotation Servo, el mismo que convierte los pulsos estándar de la posición del servo en una velocidad de rotación continua. Es dirigido por un micro controlador sin necesidad de electrónica adicional. El servo incluye un potenciómetro ajustable que se puede utilizar para centrar el mismo. El motor es adecuado en el campo de la robótica móvil como son los seguidores de línea, robots zumo, etc.

En la Figura 43, nos muestra el servo motor a usarse en la tracción del robot



Figura 43: Parallax (Futaba S148) Continuous Rotativos Servo
Fuente:(NAYLAMP Mechatronics, 2016)

En la tabla 33 contiene las características técnicas del servo motor mencionado anteriormente:

Tabla 33:
Especificaciones técnicas servo motor

Especificación	Magnitud
Dimensiones	40x20x38 mm
Modelo	Futaba S148
Voltaje de operación	4.8 a 6V
Velocidad angular nominal	30 RPM
Velocidad sin carga	50 RPM a 6V
Velocidad con carga	39 RPM a 6V
Torque de salida	2.7 kg-cm a 6V
Consumo máximo de corriente	150Ma
Peso	43 g

3.6.1.3. Potencia requerida

Para calcular la potencia requerida se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- La velocidad a la que se mueve la plataforma se considera constante, este valor es 10cm/s.
- Los cálculos se realizarán cuando la plataforma se encuentra cargada al máximo valor posible, este valor es de 0.8 kg aproximadamente.
- Las ruedas son de 51.80 mm de diámetro, con un radio de 26 mm.

En la figura 44 y 45 contienen el diagrama de cuerpo libre de la vista lateral de la plataforma diferencial diseñada, el mismo que sirve para el cálculo de reacciones en la rueda loca y llantas traseras. Reacciones que serán utilizadas más adelante para el cálculo de la potencia que debe cumplir el servomotor.

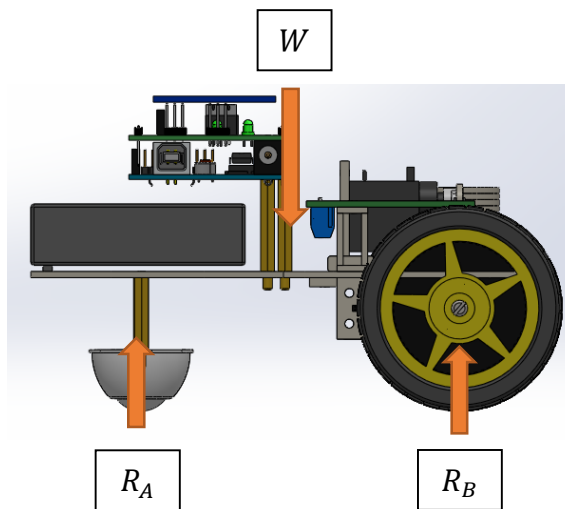


Figura 44: Diagrama de cuerpo libre

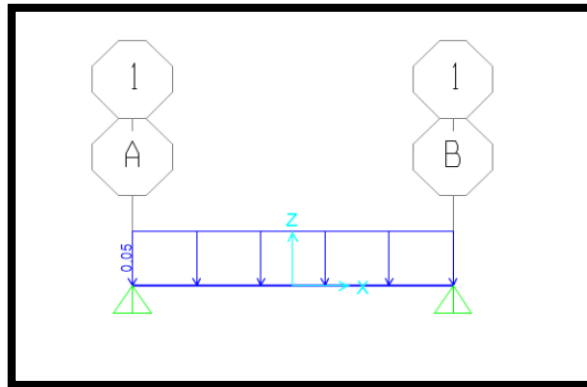


Figura 45: Diagrama de cuerpo libre con carga distribuida

$$R_A + R_B = \omega \quad (3.1)$$

$$R_A + R_B = \frac{0.8}{1000} \times 9.81$$

$$R_A + R_B = 0.00785 \text{ N}$$

$$2 R_A = 0.00785 \text{ N}$$

$$R_A = \mathbf{0.00393 \text{ [N]}}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$R_B \times d - R_A \times d = 0 \quad (3.2)$$

$$R_B \times d = R_A \times d$$

$$R_B = R_A$$

$$R_B = 0.00393 \text{ [N]}$$

$$R_{LLANTA} = \frac{R_B}{2}$$

$$R_{LLANTA} = \frac{0.00393}{2} = 0.00197 \text{ [N]}$$

En la figura 46 se puede ver el diagrama de cuerpo libre para la llanta lateral de la plataforma el cual permite sacar la velocidad angular y el torque que se requiere para el movimiento de la plataforma movil.

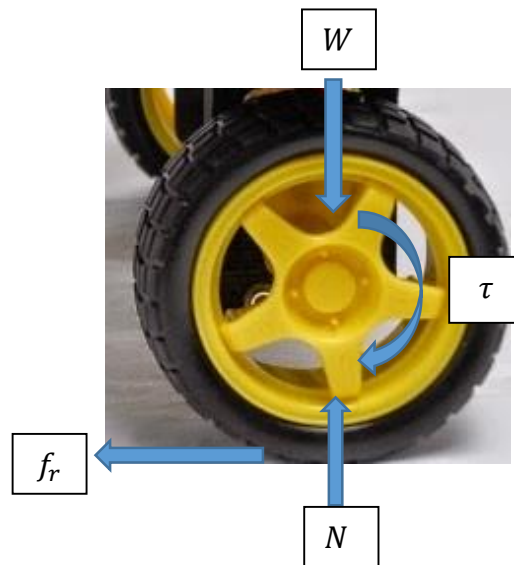


Figura 46: Diagrama de cuerpo libre llanta trasera

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (3.3)$$

$$\omega = \frac{10 \frac{cm}{s}}{2.6 \text{ cm}}$$

$$\omega = 3.85 \text{ [rad/s]}$$

$$\sum \tau = 0$$

$$f_r \times r = \tau_{MOTOR} \quad (3.4)$$

$$\tau_{MOTOR} = f_r \times 2.6 \text{ cm}$$

$$\tau_{MOTOR} = u \times N \times 2.6 \text{ cm}$$

$$\tau_{MOTOR} = 0.4 \times 0.8 \text{ kg} \times 2.6 \text{ cm}$$

$$\tau_{MOTOR} = \mathbf{0.832 [kg cm]}$$

$$Pot = \tau \times \omega \quad (3.5)$$

$$Pot = 0.832 \times 3.85 \text{ rad/s}$$

$$\mathbf{Pot = 3.203 [W]}$$

La selección de los motores es la más adecuada ya que el torque de salida de los servomotores es de 2.7 Kg-cm superior a lo que requiere la plataforma, los cuales dan la potencia necesaria para que el robot se desplace y a su vez nos ayudarán en la orientación y direccionamiento. Con ello podemos satisfacer la potencia que necesita todo el sistema para cumplir el objetivo trazado durante este proyecto.

3.6.1.4. Resistencia del material

El esfuerzo cortante que soporta el material es menor al esfuerzo permisible que detalla la ecuación $\tau_{xy} = 0.577 S_y$ de la teoría de la energía de distorsión para materiales (Nisbett, 2008), por tanto el diseño es aceptable, y la selección del material es la adecuada para resistir los esfuerzos a los que está sometida la estructura.

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{27.41 \text{ N}}{3 \times 120} = 0.076 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0.011 \text{ Ksi}$$

$$\tau_{xy} < 0.557 S_y$$

$$\tau_{xy} < 0.557 \times 7.09 \text{ Ksi} < 3.95 \text{ Ksi}$$

3.6.2. Diseño Electrónico

3.6.2.1. Selección de elementos electrónicos

En uno de los módulos de diseño se escoge entre varias alternativas, como el mejor tipo de accionamiento para la plataforma móvil, un servomotor de rotación continua bidireccional,

debido a que puede ser controlado de manera directa por un microcontrolador, por tanto no requiere electrónica adicional.

Pero para el trazado de la trayectoria deseada, se elabora una relación entre los grados de giro necesarios para alcanzar una figura geométrica básica y los pulsos del servomotor por tanto se usará un circuito de activación del autoacoplador para el conteo de pulsos cada vez que una ranura de nuestro disco del encoder pase por el mismo.

En este caso el autoacoplador es el PC817 el cual posee un fotodiodo infrarrojo (emisor) y un foto resistor (detector), ofreciendo pines de salida Colector_Emisor.

Por tanto se revisa en las curvas de las figuras 48 y 49, el valor de corriente y voltaje seguros de trabajo, donde en la figura 49 se puede observar que existe una area de operacion segura debajo de la linea entrecortada, por tanto se trabaja en todo el rango de tensiones (colector-emisor), ademas con una corriente de LED de 20mA no se puede trabajar con valores de voltaje a 6V en el fototransistor.

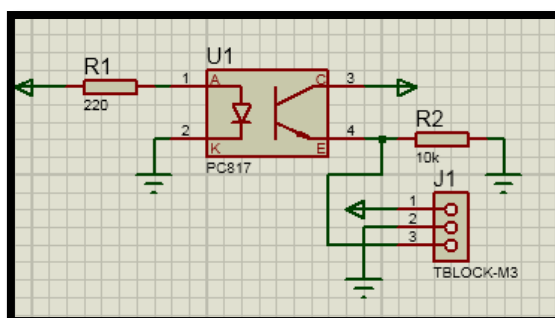


Figura 47: Placa autocoplador_encoder

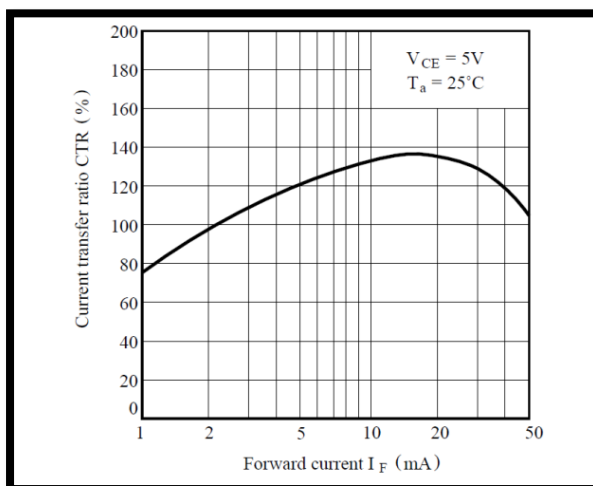


Figura 48: Relación de transferencia de corriente vs Corriente directa

Fuente: (SHARP, 2016)

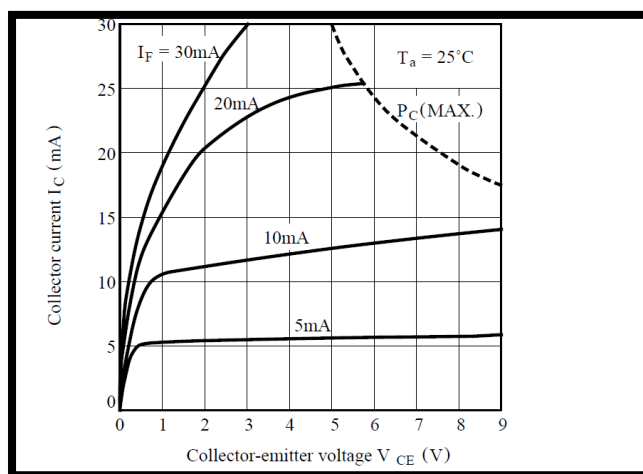


Figura 49: Colector de corriente vs. Colector - emisor voltaje
Fuente:(SHARP, 2016)

3.6.2.2. Selección de la tarjeta de control

Se escoge para realizar el control de la plataforma móvil, una placa de ARDUINO UNO ya que posee un microcontrolador Atmel y todo los elementos electronicos para dar un soporte óptimo, incluye puerto USB con un adaptador USB-serie que permite programar desde una PC y reguladores de tension. A continuacion destacamos sus características técnicas para su correcto uso:

Tabla 34:
Características Técnicas ARDUINO UNO

Descripcion	
Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operacion	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 - 12V
Voltaje de entrada (Limite)	6 -20V
Pines para entrada - salida digital	14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines de entrada analogica	6
Corriente: pin IO	40 Ma
Corriente: pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0.5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

3.7. Módulo 2. Posicionamiento

3.7.1. Subsistema 1. Ubicación y planeación

Se realiza un análisis de cada una de las trayectorias para formar tres figuras geométricas básicas por parte de las dos plataformas móviles de manera individual y grupal evidenciando la robótica cooperativa en el trabajo a efectuarse, mediante la relación entre el ángulo de giro para alcanzar una posición deseada y el número de pulsos de cada servomotor, así como del método de matrices de rotación y translación.

Se describe la cinemática de la tracción diferencial que posee nuestras plataformas móviles, para llegar a determinar la posición de las mismas.

3.7.1.1. Cinemática

- Al poseer diferentes tipos de ruedas (tracción y dirección) tienen diferentes propiedades cinemáticas.
- El robot móvil tiene 3 grados de libertad respecto a una referencia: posición en el plano (X, Y) y orientación (Q), como podemos observar en la Figura 50.
- Idealmente, independientemente de donde inicie, nuestro robot puede moverse a cualquier posición y orientación (X, Y, Q).

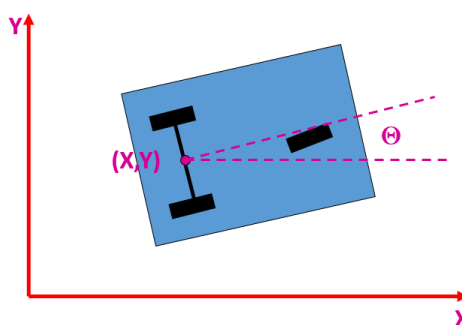


Figura 50: Configuración diferencial (posición y orientación)
Fuente: (Sánchez, 2016)

3.7.1.2. Restricciones

- Holonómicas: los diferentes grados de libertad están desacoplados. Robots diferenciales y síncronos: se puede desacoplar la posición de orientación (rotando sobre su eje).

- No-holónicas: los grados de libertad están acoplados. Triciclos y carros: para dar vuelta debe moverse hacia el frente o hacia atrás – es más complejo llegar a la posición final deseada.

3.7.1.3. Esquema de movimiento

En la Figura 51, se puede observar las diversas combinaciones entre las ruedas de un robot móvil diferencial, para realizar sus movimientos.

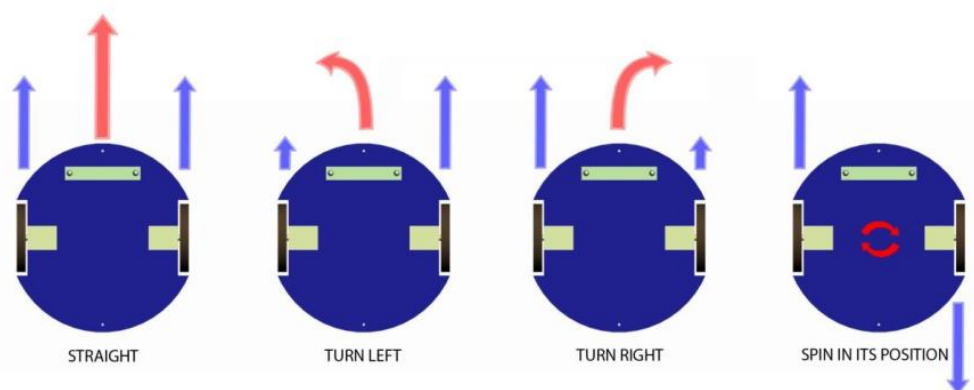


Figura 51: Combinaciones configuración diferencial
Fuente: (Sánchez, 2016)

En la Figura 52, se observa las variables presentes en un robot móvil diferencial entorno a su centro instantáneo de rotación.

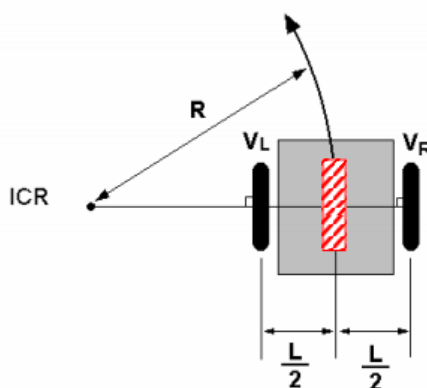


Figura 52: Configuración diferencial (giro centro instantáneo de rotación)
Fuente: (Sánchez, 2016)

3.7.1.4. Métodos de determinación de posición

Consiste en el uso de las ecuaciones que rigen la cinemática de un robot móvil para determinar la posición que este en el entorno en que se mueve, él que tiene como referencia un

sistema coordinado (x, y, z) . La posición se calcula a partir de los cambios que se den en los sistemas de locomoción del robot (servomotores). En la siguiente estimación de la posición de nuestra plataforma móvil, se asume que las ruedas no tienen deslizamiento alguno, de esta manera el movimiento de las llantas del robot se convierte totalmente en un movimiento de traslación y/o rotación.

Para el análisis cinemático del robot móvil de tracción diferencial se tiene en cuenta las dimensiones: L que es la longitud entre las dos ruedas del vehículo y r es el radio de las ruedas como se ve en la Figura 53.

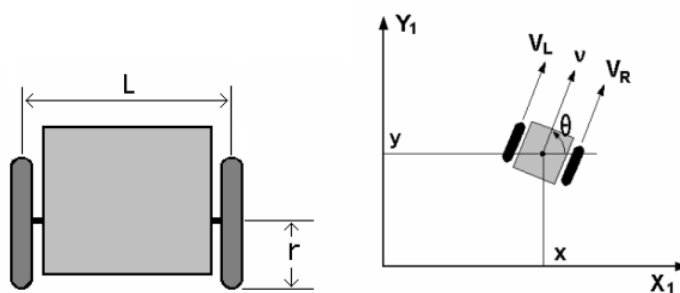


Figura 53: Variables análisis cinemático
Fuente: (Sánchez, 2016)

Para el modelo se supone que su desplazamiento es en dos dimensiones, en la Figura 53 se muestra la localización del robot en el punto (x, y) donde “ v ” es la velocidad lineal del móvil, “ V_L ” y “ V_R ” la velocidad tangencial de cada una de las ruedas.

Para determinar la posición se puede utilizar algunos métodos de los cuales seleccionamos el de las matrices de rotación y traslación.

Se obtiene el modelo matemático para determinar la posición del móvil de tracción diferencial a partir de las velocidades “ V_L ” y “ V_R ”, las cuales se obtienen con la siguiente ecuación:

$$V_L = \omega_L \times r ; V_R = \omega_R \times r \quad (3.7)$$

En donde “ ω_L ” y “ ω_R ” son las velocidades angulares de cada rueda. Las velocidades lineales y angulares del robot se obtienen con las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} = \frac{(\omega_L + \omega_R) \times r}{2} \quad (3.8)$$

$$w = \frac{VR - VL}{L} = \frac{(wL - wR) \times r}{L} \quad (3.9)$$

Sabiendo que el robot se mueve en una superficie plana, sin deslizamiento y que los ejes de las ruedas son perpendiculares a la superficie plana, se puede demostrar que si $p = [x, \theta]$, es el vector de coordenadas del punto guía del robot y la orientación del mismo y si $q = [v, w]$, es el vector de la velocidad lineal y angular del móvil, se puede escribir la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & 0 \\ \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ahora sustituyendo la ecuación 3.8 y 3.9 en la ecuación 3.10 se obtiene la ecuación 3.11.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \times \sin \theta/2 & -r \times \sin \theta/2 \\ r \times \cos \theta/2 & r \times \cos \theta/2 \\ -r/L & r/L \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_L \\ W_R \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

La ecuación 3.11 representa la matriz de movimiento lineal y rotacional general para el robot móvil de arquitectura diferencial, con el cual se obtiene las velocidades de las ruedas necesarias para girar y trasladarse al punto especificado por el usuario y de esta manera realizar el control de la plataforma.

A continuación se detalla la planeación de cada trayectoria, para llegar a la realización y trazo de figuras geométricas básicas (círculo, cuadrado y triángulo) plateadas con anterioridad desde su punto inicial (home) hasta el punto final de manera individual así como grupal, que es el objetivo del presente trabajo.

Por ello se define el tamaño de cada figura a ser trazada, seguido de la trayectoria de ubicación para comenzar el trazado de la misma, después de la trayectoria de trazado y finalmente la trayectoria a seguir para ubicarse en el punto final.

Además se relacionó el ángulo de giro para alcanzar la trayectoria de ubicación, trazado y punto final con el número de pulsos de cada servomotor como se muestra a continuación:

Variables

- Radio de contacto de la rueda: 33.5 mm
- Número de agujeros del disco incremental: 60 (2 pulsos por agujero)
- Pulsos por revolución: 120

- Avance por revolución:

$$2 \times \pi \times R \quad (3.12)$$

$$2 \pi \times 33.5 = 210.5 \text{ mm}$$

- Longitud del lado de la figura:
Revoluciones por lado: 2

$$\text{Longitud} = \text{Avance por revolución} \times \text{revoluciones por lado} \quad (3.13)$$

$$\text{Longitud} = 210.5 \times 2 = 421 \text{ mm}$$

- Ángulo de giro 90° horario y anti horario:

$$\text{Número de ángulos por revolución} = \frac{360^{\circ}}{90^{\circ}} = 4$$

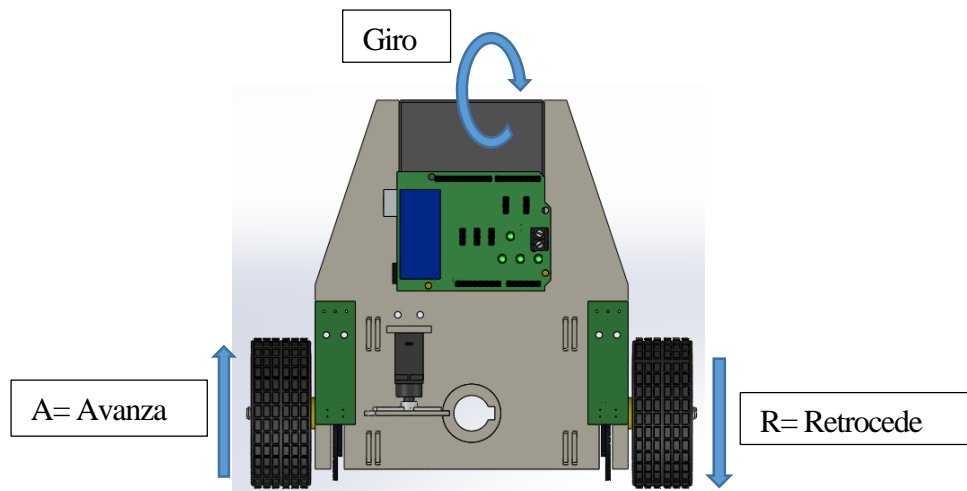


Figura 54: Diagrama de cuerpo libre

$$\text{Número de pulsos} = \frac{\text{Pulsos por revolución}}{\text{Número de ángulos por revolución}} \quad (3.14)$$

$$\text{Número de pulsos} = \frac{120}{4} = 30$$

En la tabla 35 se describe un resumen de los diferentes ángulos de giro que se necesita para la trayectoria de ubicación, trazado y punto final en relación con el número de pulsos necesarios para realizar cada movimiento para el desarrollo de las diferentes trayectorias para finalmente formar la figura geométrica deseada por el usuario.

Tabla 35:
Relación entre ángulos de giro y número de pulsos

Ángulo de giro horario	Número de ángulos por revolución	de Pulsos por revolución	Número de pulsos <i>Número de pulsos</i> <i>Pulsos por revolución</i> = $\frac{\text{Número de pulsos}}{\text{Número de ángulos por revolución}}$
90°	4	120	30
60°	6	120	20
30°	12	120	10
12°	30	120	4
6°	60	120	2

En la figura 55 se indica cada una de las trayectorias mencionadas y necesarias para formar cada figura geométrica planteada.

- ⊙ PUNTO DE INICIO / FINAL
 - ⊙ PUNTO DE INICIO
 - ⊙ PUNTO FINAL
- NUMEROS:
- TRAYECTORIA DE UBICACION
 - TRAYECTORIA DE TRAZADO DE FIGURA
 - TRAYECTORIA DE AL PUNTO FINAL
- LONGITUDES:
- L1 421 mm (240 PULSOS)
 - L2 210.5 mm (120 PULSOS)
 - L3 45.61 mm (26 PULSOS)
 - L5 15.32 mm (9 PULSOS)
- GIROS:
- 90° 30 PULSOS
 - 60° 20 PULSOS
 - 30° 10 PULSOS
 - 12° 4 PULSOS
 - 6° 2 PULSOS

Figura 55: Descripción de colores de trazado de trayectorias

En las Figuras 56 a la 61, podemos observar las trayectorias a seguir por el robot para formar cada figura geométrica, las mismas que fueron realizadas en AutoCAD con todo lo descrito anteriormente.

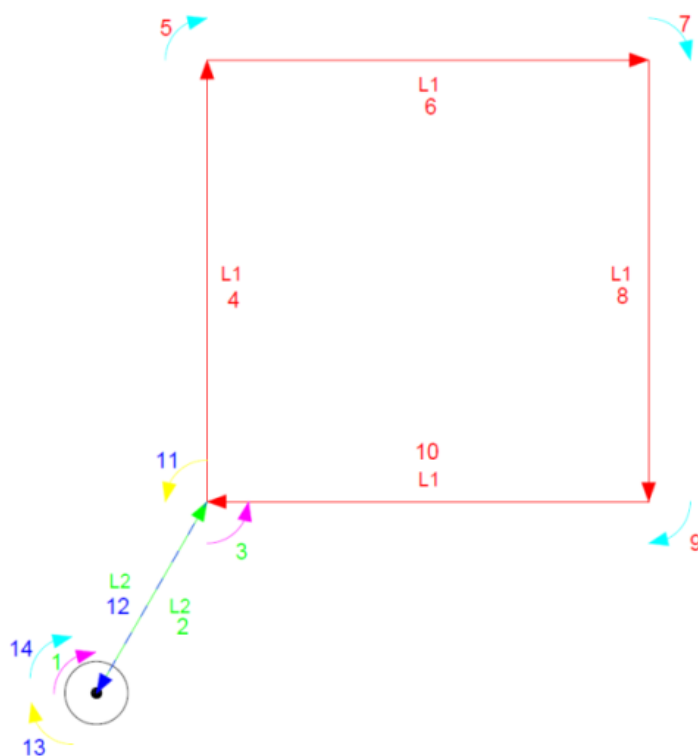


Figura 56: Trayectoria de trazado un solo robot (cuadrado)

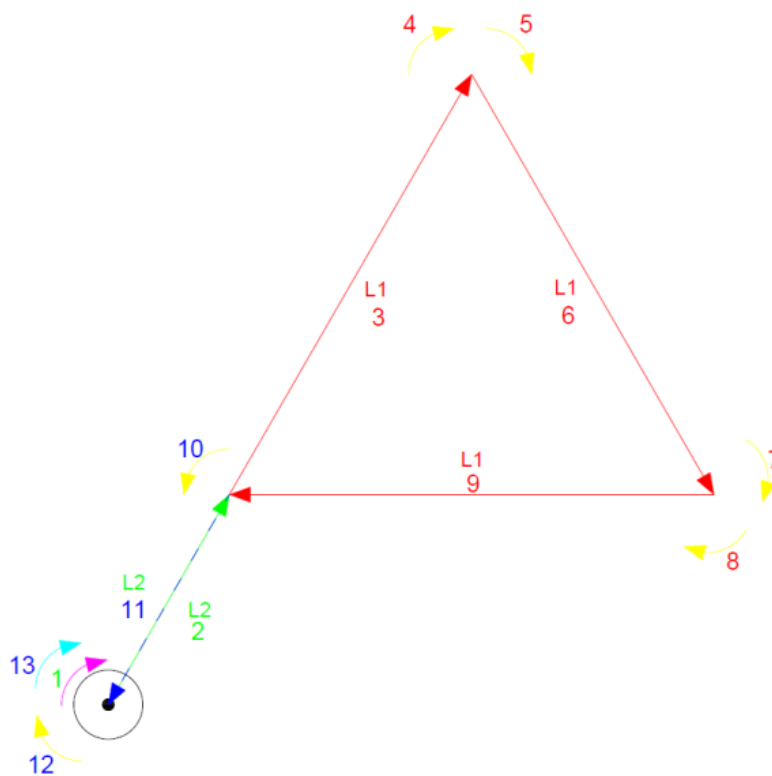


Figura 57: Trayectoria de trazado un solo robot (triángulo)

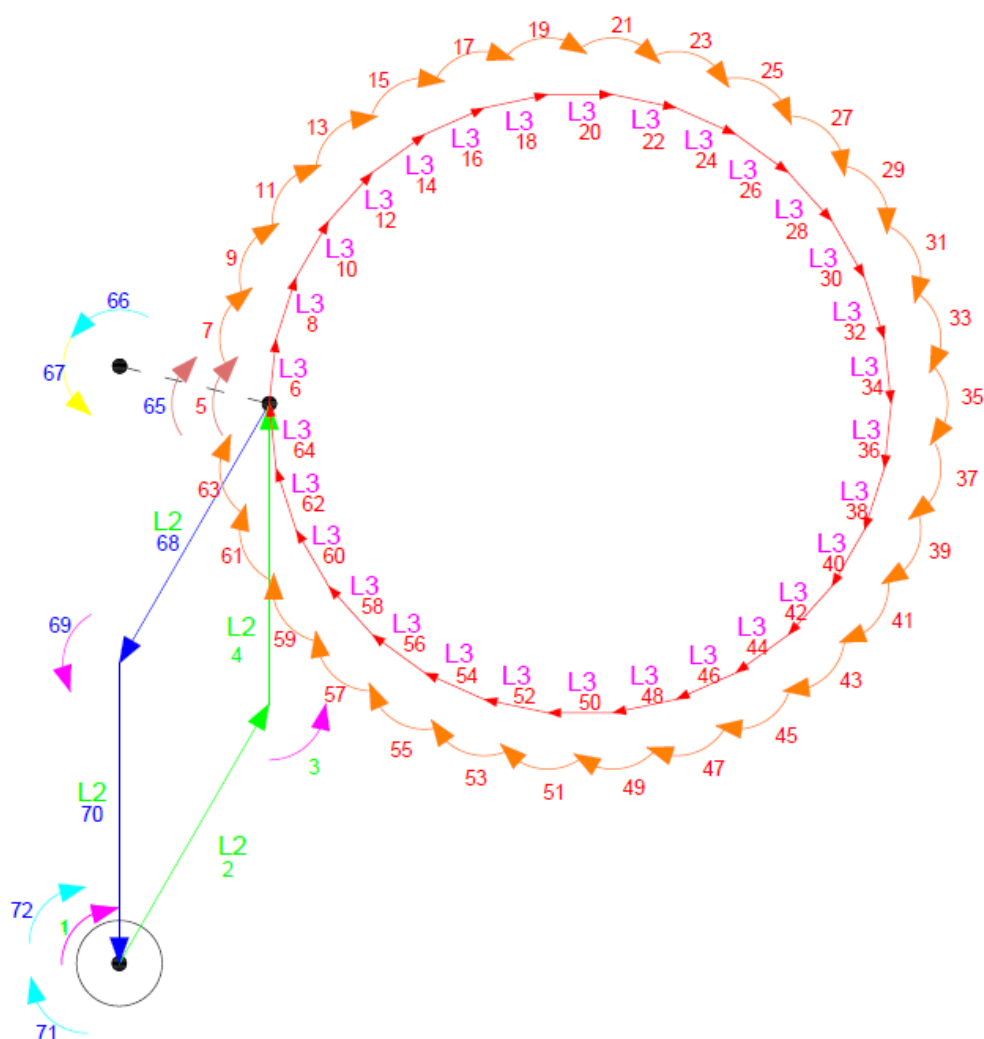


Figura 58: Trayectoria de trazado un solo robot (círculo)

Además en la figura 56 a la 58 se puede observar la planeación previa de tres figuras geométricas básicas con una sola plataforma diferencial tomando en cuenta que a través de números de manera ascendente te muestra toda la secuencia a seguir desde su punto inicial home hasta el punto final. Los colores permiten ver qué tipo de trayectoria se está realizando como se puede identificar en la figura 55, así como la longitud de cada lado de la figura y cuantos pasos se requiere enviar a cada servomotor para generar los ángulos de giro necesarios para ubicarse en la posición deseada.

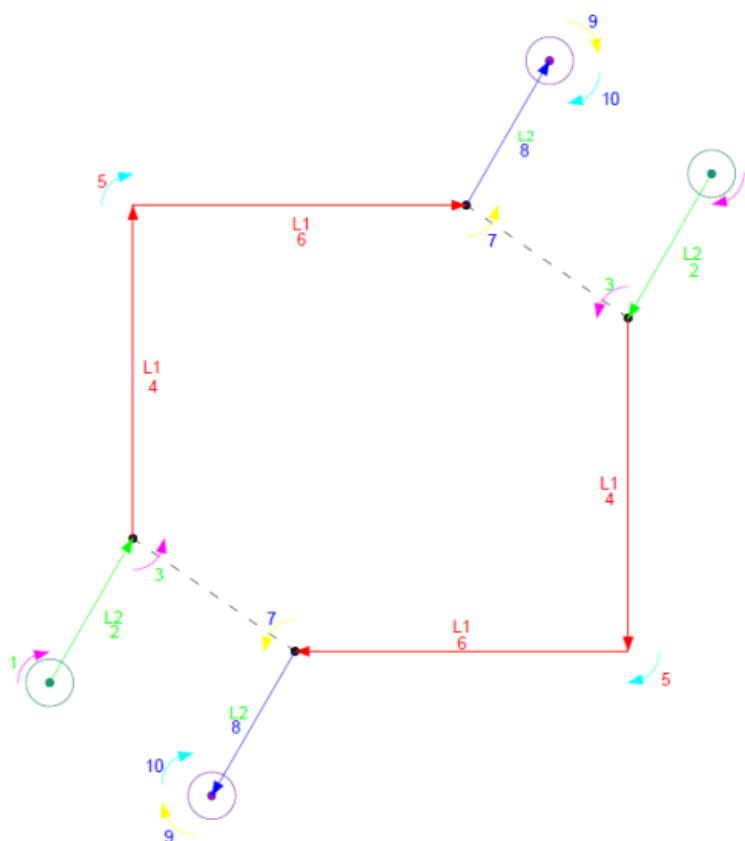


Figura 59: Trayectoria de trazado dos robots (cuadrado)

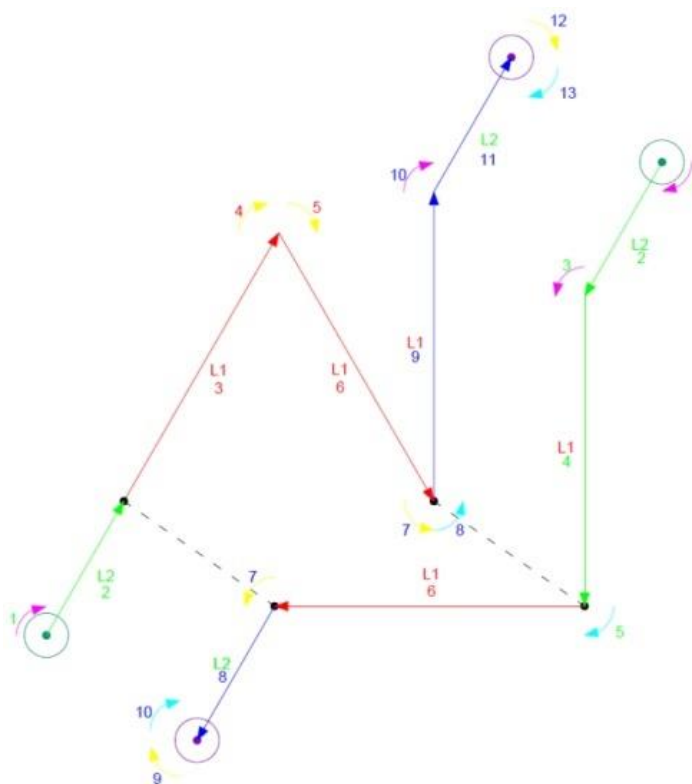


Figura 60: Trayectoria de trazado dos robots (triángulo)

Además en la figura 59 a la 61 se puede observar la planeación previa de tres figuras geométricas básicas con dos plataformas diferenciales tomando en cuenta que a través de números de manera ascendente se muestra toda la secuencia a seguir desde su punto inicial home hasta el punto final. Los colores permiten ver qué tipo de trayectoria se está realizando como se puede identificar en la figura 55, así como la longitud de cada lado de la figura y cuantos pasos se requiere enviar a cada servomotor para generar los ángulos de giro necesarios para ubicarse en la posición deseada.

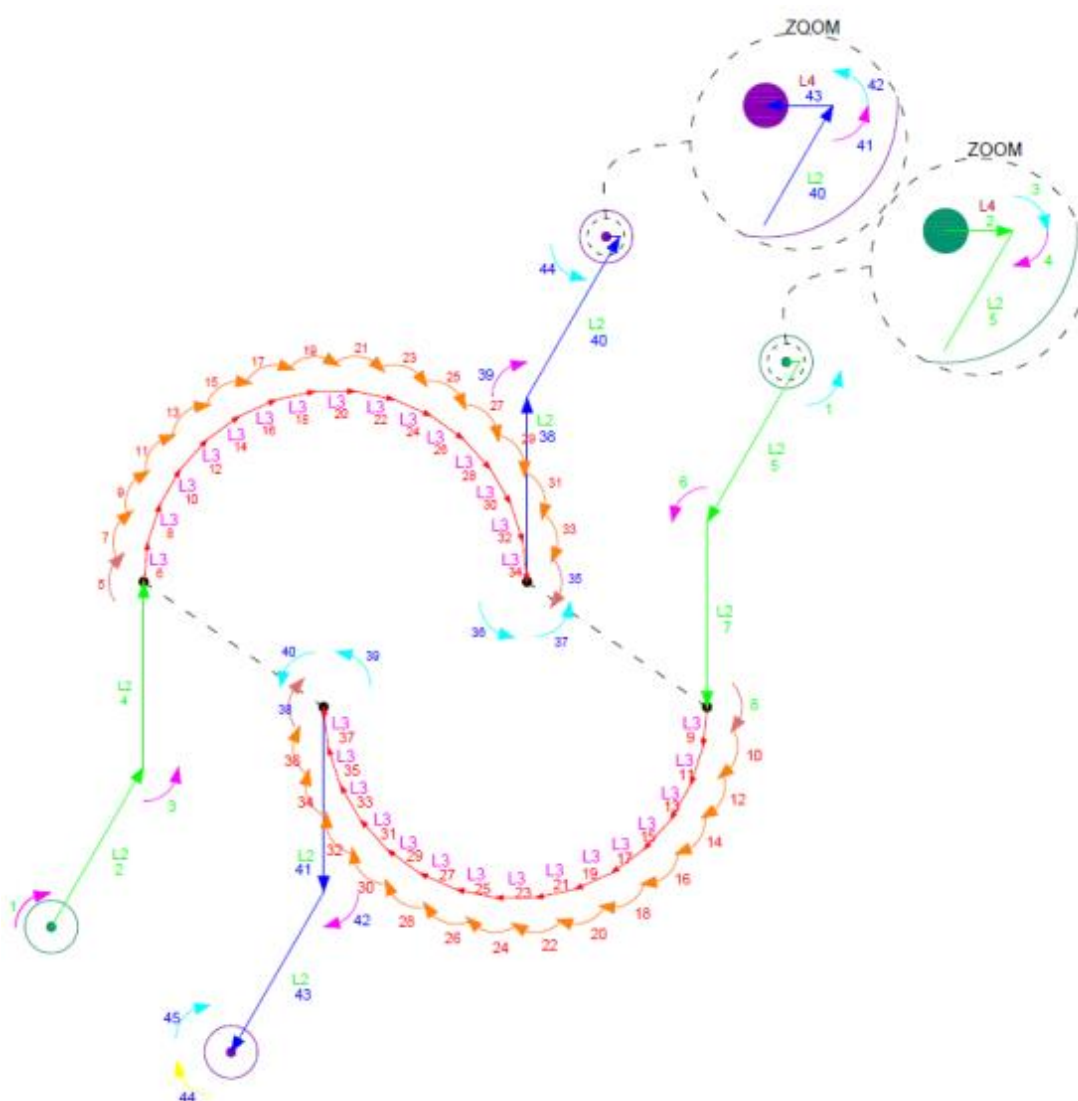


Figura 61: Trayectoria de trazado dos robots (círculo)

3.8. Módulo 3. Control

3.8.1. Subsistema 1. Tipo de control

3.8.1.1. Centralizado

En este tipo de control todos los robots móviles dependen únicamente de una unidad central, encargada del procesamiento de la información. La misma que retroalimentará a cada robot conforme sea necesario, es decir es la que toma las decisiones. La ventaja más notable de este tipo de control es que la unidad tiene toda la información necesaria para dar solución a los problemas de una manera eficiente. Y como desventaja es que la unidad central tiene demasiada información lo que puede ocasionar una congestión al momento que recibe los datos, sin olvidar que al momento que la unidad central falle todo el sistema dejará de funcionar ya que los demás robots perderían la facultad de decidir.

En el presente proyecto este tipo de control se realiza por medio de la visión artificial y la identificación de cada contorno perteneciente a figuras geométricas básicas, retroalimentando a la central con dicha información, para que las plataformas diferenciales realicen la ubicación y planeación de la trayectoria deseada.

3.8.2. Subsistema 2. Software de control

El sistema de control para los dos robots y la cámara web, se realiza por medio del paquete de software Python como intérprete de Open CV a su vez con la ayuda de Liclipse como consola de programación en C++ y la creación de una HMI para el usuario complementándolo con Numpy programa de procesamiento de matrices y finalmente Pyserial para la habilitación de puertos seriales dando paso a la comunicación inalámbrica.

El proceso iniciará con el encendido de todos los sistemas, verificación de la comunicación entre los diversos dispositivos y el emparejamiento de los módulos bluetooth de cada robot móvil a la computadora central, así como el correcto funcionamiento y calibración previa de la cámara.

La secuencia de procesos a seguir se puede observarse en la Figura 62, a continuación se describirá cada paso del mismo:

1. Se selecciona el número de robots con los que se desea ejecutar la simulación de una de las tres figuras geométricas (círculo, cuadrado, triángulo), teniendo como opciones uno o dos robots.

2. Con el uso de tarjetas, las que llevan impresas una de las tres figuras geométricas de color rojo, se podrá seleccionar la figura que se desea llevar a cabo con uno o dos robots móviles. Para ello se colocará cada tarjeta frente a la cámara la cual captará la imagen en cada instante de tiempo, enviando la información a la central de procesamiento. Donde se convertirá dicha imagen de una escala de color BGR a HSV, para una precisión mayor en la detección del mismo. Posteriormente establecemos los rangos de colores HSV bajos y altos (matiz, saturación, valor) para detectar el color complementado con la creación de una máscara.
3. Filtrar el ruido de la máscara, eliminando las zonas blancas más pequeñas y dejando las más grandes que son los objetos detectados. Posteriormente suavizamos los contornos y aplicamos el filtro Canny para el cálculo de los mismos. Después realizamos el cálculo de áreas de los contornos detectados, delimitamos un área de trabajo, por ende solo guardaremos los contornos que corresponde a esa área de análisis. Finalmente aproximamos el contorno a una lista de longitud 3 que se refiere a los vértices de la figura detectada que en este caso es un triángulo, a 4 un cuadrado y un círculo mayor a 5, dibujamos ese contorno y se muestra en la pantalla la imagen de una de las figuras detectadas.
4. Una vez que se tengan los datos necesarios para graficar las figuras, se envía a los robots por medio de una comunicación bluetooth una cadena de caracteres, en donde podemos ver que la figura toma un valor de 30, 40 o 50 si es un triángulo, cuadrado o círculo y la combinará con la opción 1 o 2 que se refiere al número de robots y por consiguiente ese dato está asignado a una letra respectivamente. Ese dato es enviado a los robots móviles y finalmente se ejecuta la planeación de la trayectoria de la figura deseada.
5. Se verifica la recepción de los datos en cada robot, si esto no se consigue se volverán a enviar los datos, al pasar un tiempo sin comunicación se le pedirá al usuario comprobar la comunicación entre elementos.
6. Una vez que se verifique la recepción de datos los robots proceden a realizar las figuras, finalizada la secuencia se puede ingresar una nueva.

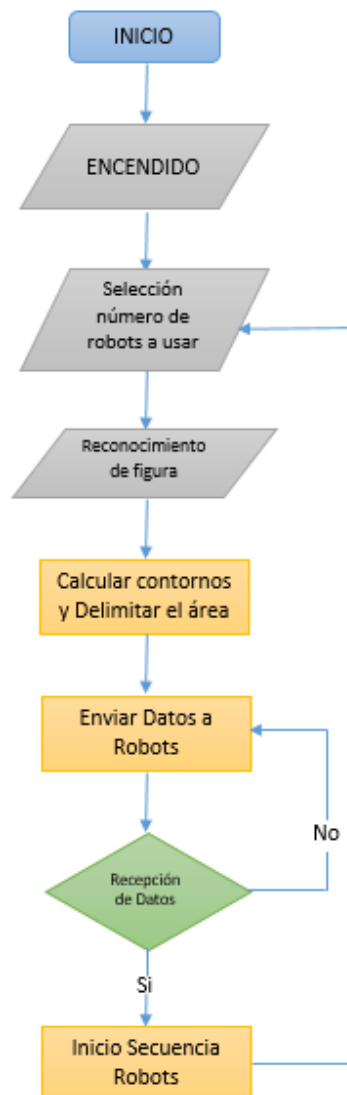


Figura 62: Diagrama de flujo general del proceso de generación de figuras geométricas

3.9. Resumen

- Después del análisis de necesidades se obtuvo los subsistemas a diseñar para facilitar el diseño e implementación de las plataformas móviles para realizar trabajo cooperativo:
 1. Estructura mecánica:
 - a. Tipo de configuración
 - b. Tipo de accionamiento
 2. Posicionamiento
 - a. Ubicación y planeación

3. Control
 - a. Tipo de control
 - b. Software de control
- Las necesidades fueron transformadas a un lenguaje técnico por medio del establecimiento de una métrica, lo que resulta esencial para la selección del concepto. El análisis lo realizamos a través de una matriz de la casa de la calidad (necesidad vs métrica) y mediante ello establecimos los diferentes sistemas con sus respectivos subsistemas para la facilidad de diseño y la selección final del concepto. Conjuntamente con el método ordinal corregido de los criterios ponderados, en donde se realiza una ponderación de criterios de cada una de las opciones disponibles para cada sistema, obteniendo finalmente la opción con mayor ponderación. Se puede observar en la siguiente detalle las selección final para cada módulo y subsistema:
 1. Estructura mecánica:
Tipo de configuración: Diferencial
Tipo de accionamiento: Motores DC, servomotores
 2. Posicionamiento:
Ubicación y planeación: Visión artificial
 3. Control:
Tipo de control: centralizado
Software de control: Open CV

Capítulo 4

Construcción y funcionamiento

El capítulo detalla la instalación de los elementos mecánicos, electrónicos y eléctricos que forman parte de la estructura física y operativa de la plataforma móvil. Además se detalla los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento mecánico, control por Arduino y el reconocimiento de contornos de figuras geométricas por medio de la visión artificial en Open CV dando como resultado el trazo de las mismas.

4.1. Construcción del robot móvil

La construcción de los robots móviles, se inicia en la fabricación de la estructura mecánica, para la cual se realizó un diseño previo y los planos correspondientes a cada elemento mecánico, consta en el anexo A del presente proyecto y finalmente se realiza el corte por láser de acrílico transparente de cada uno de los accesorios que forman parte de la plataforma móvil como se muestra en las figuras 63 a la 66.

A continuación se muestra una galería de imágenes de las piezas cortadas para finalmente realizar el ensamblaje total de la plataforma:



Figura 63: Rueda Encoder

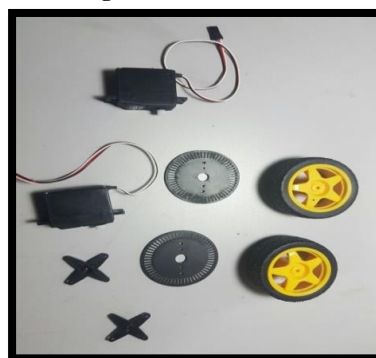


Figura 64: Llantas de goma_Parallax (Futaba S148) Continuous Rotation Servo

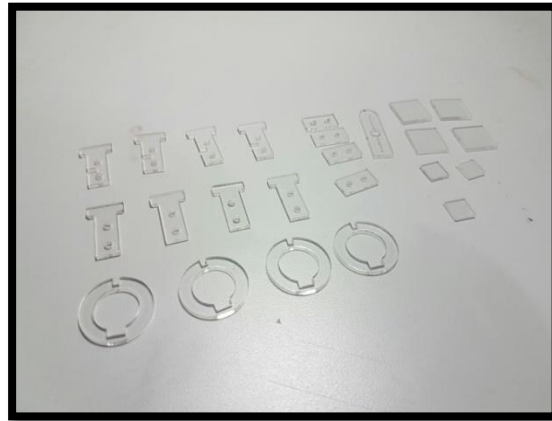


Figura 65: Soportes servomotores_ Brazo lápiz

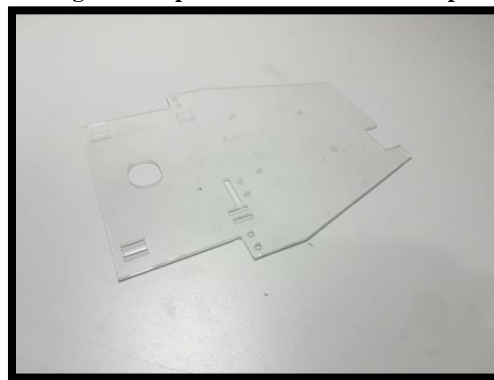


Figura 66: Base robot móvil

4.1.1. Ensamblaje

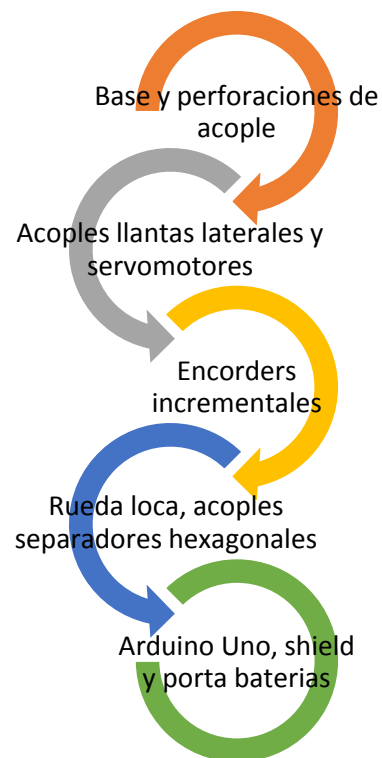


Figura 67: Diagrama de ensamble plataforma móvil

En la parte mecánica se procede a ubicar los servomotores que controlarán el movimiento de cada llanta lateral con soportes para una correcta sujeción. Debido a que cada llanta esta coloca de manera directa al servomotor, sin ninguna reducción o transmisión, seguido de una rueda de enconder para poder tener un conteo de pasos constante. Después la colocación de una rueda loca por medio de dos separadores hexagonales y por último la colación de un servomotor y un brazo para un marcador que ira rayando la trayectoria descrita.

En la parte electrónica, eléctrica y de control se coloca la placa de Arduino, un módulo bluetooth para la comunicación inalámbrica y finalmente la placa de los dos encoders de las llantas laterales. Además se añade una placa con borneras y conectores para una mejor distribución del espacio y cableado, seguido de la colocación de un porta baterías. Véase de la figura 68 a la 71 una galería del ensamble total del robot móvil.

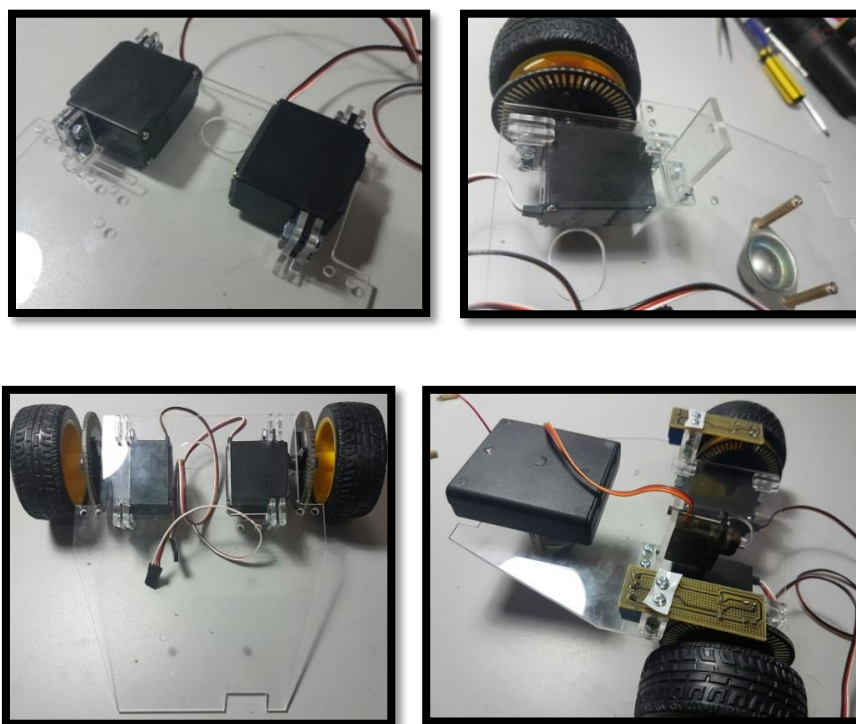


Figura 68: Ensamble servomotores, encoders incrementales, rueda loca



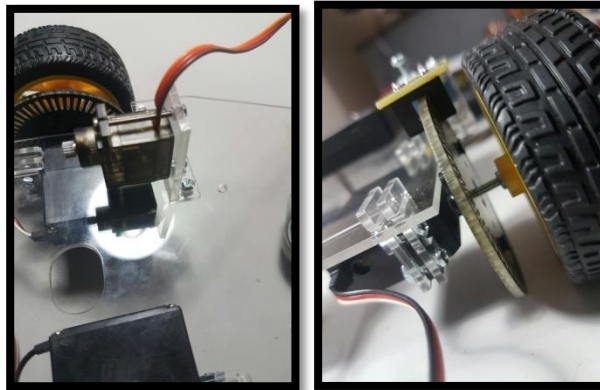


Figura 69: Ensamble llantas traseras, servomotor de brazo porta marcador para trazado de trayectoria



Figura 70: Ensamble brazo porta marcador

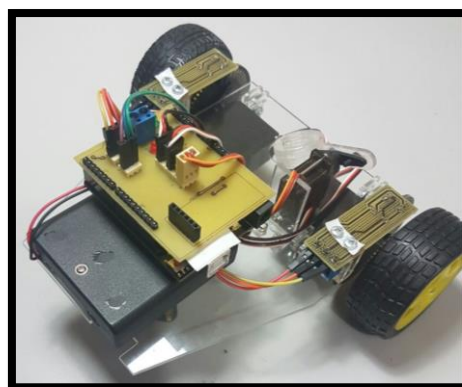


Figura 71: Ensamble mecánico, electrónico y eléctrico final

4.1.2. Control por Open CV

En cuanto al control de las plataformas móviles, para iniciar se instala todos los paquetes respectivos de Open CV para su correcto funcionamiento en Windows tales como: Python intérprete de Open CV, Liclipse como consola de programación en C++, Numpy para procesamiento de matrices y finalmente Pyserial para la habilitación de los puertos seriales.

Razón por la cual en Lipclise para el reconocimiento todos los programas mencionados anteriormente. Siempre se debe crear primero un nuevo PyDev Project, en el cual se direcciona al intérprete a su correcta configuración y asignación de sus dependencias (véase figura 72). Seguido de la creación de PyDev package el cual nos genera un `_init_.py` que representa la consola de programación como se puede apreciar en la figura 73 y 74. Y finalmente al momento de ejecutar, nuestro programa implementado, lo direccionamos al intérprete Python Run, (véase figura 75).

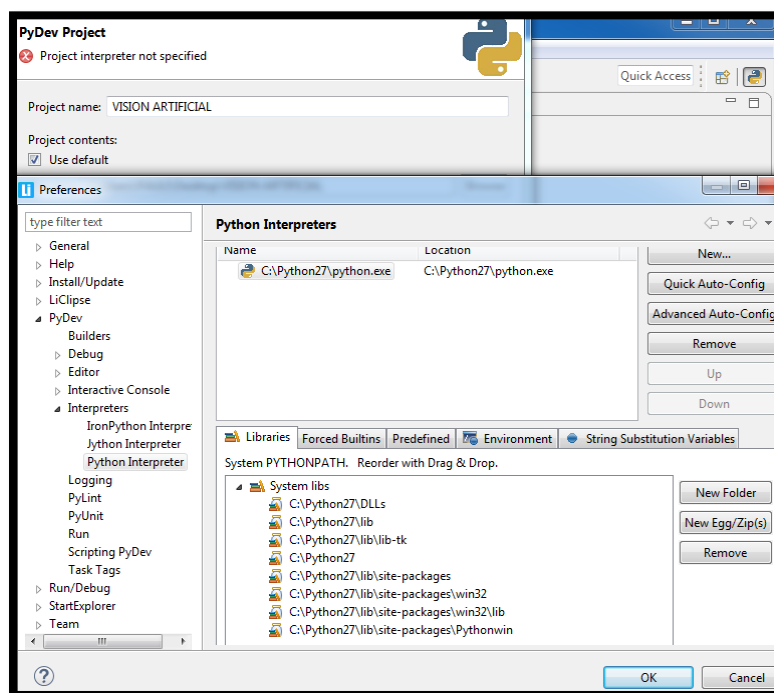


Figura 72 : PyDev Project asignación de interprete y librerías Python

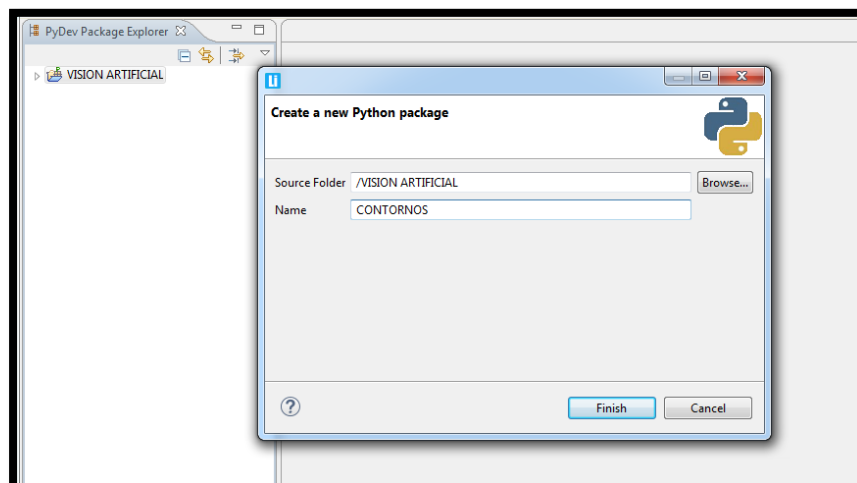


Figura 73: Creación de PyDev package y generación de un `__init__.py` consola de programación

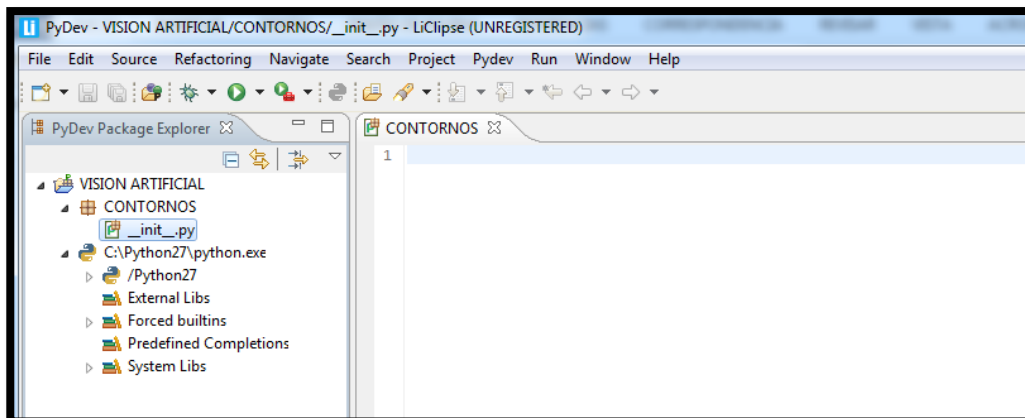


Figura 74: Consola de programación Lclipse

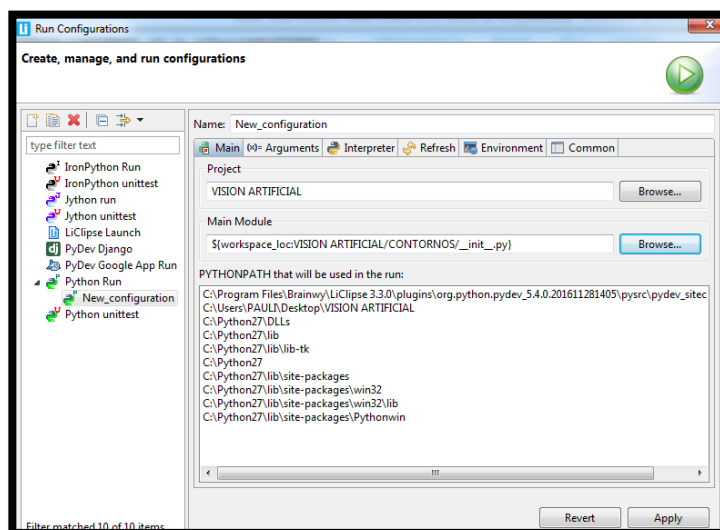


Figura 75: Python Run

4.1.3. Interfaz del usuario

Las siguientes imágenes muestra la interfaz final para el usuario, sencilla y amigable. La cual consta de tres secciones:

La primera sección el usuario puede escoger el número de robots que desea usar para la formación de una figura geométrica, es decir de manera cooperativa (2 robots) o individual, véase figura 76.

La segunda sección permite seleccionar el reconocimiento de la figura que desea el usuario una vez seleccionada la opción mencionada aparece una pantalla y se activa la cámara para ir captando imágenes en cada instante de tiempo. Con ello se puede detectar la figura que se coloca al frente de la misma y muestra que tipo de imagen detecto, véase figura 77.

La última sección permite enviar los datos de la central de procesamiento hacia los robots por comunicación inalámbrica y se reinicia la secuencia para ejecutar una nueva. Como se puede observar en la figura 78 y 79 respectivamente.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Robotica Cooperativa

1. Seleccione el numero de robots paxra la trayectoria

UN ROBOT Numero de robots: EMPEZAR

DOS ROBOTS

2. Inserte tarjeta y reconozca la figura

RECONOCER FIGURA Figura reconocida:

3. Clic en Empezar para el dibujo de las trayectorias

Autora: Paulina Campoverde

Figura 76: Selección cantidad de robots



Figura 77: Reconocimiento de figuras geométricas

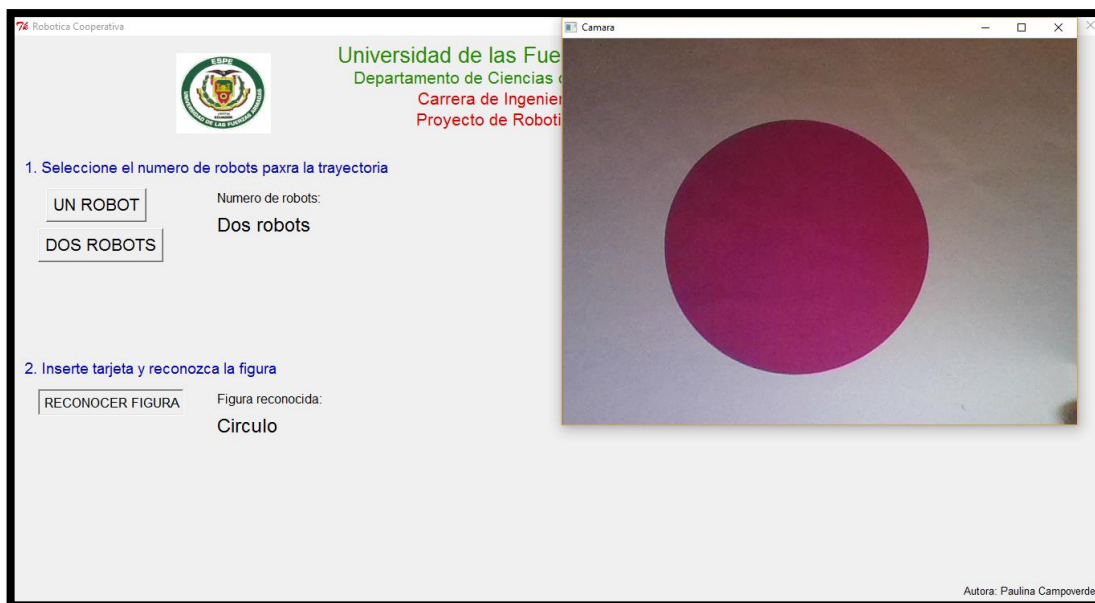


Figura 78: Captación de imágenes y reconocimiento de figura



Figura 79: Inicio de secuencia

4.2. Pruebas y funcionamiento

En la implementación de la plataforma móvil, se realiza pruebas para cada avance en el desarrollo del control así como en el ensamblaje del robot móvil. De tal manera, podremos evaluar el funcionamiento de la plataforma diferencial en tres etapas.

La primera etapa una vez finalizada la construcción y montaje de la plataforma móvil, la segunda etapa en el correcto reconocimiento de contornos y color de tres figuras geométricas: círculo, cuadrado y triángulo, y la tercera etapa la simulación de formación de las figuras geométricas deseadas por el usuario, de manera cooperativa o individual mediante la interfaz gráfica.

4.2.1. Primera evaluación

La primera evaluación es la construcción realizada para llegar a obtener la plataforma móvil. La cual consistió en la verificación de factibilidad de control con la configuración Ackerman que fue seleccionada como primera instancia para el robot móvil, además de la falta de juntas de acople adecuadas para las llantas laterales. Razón por la cual se produce un flejamiento de la base del robot y por ende las llantas traseras no estaban paralelas entre sí. Véase figura 80.

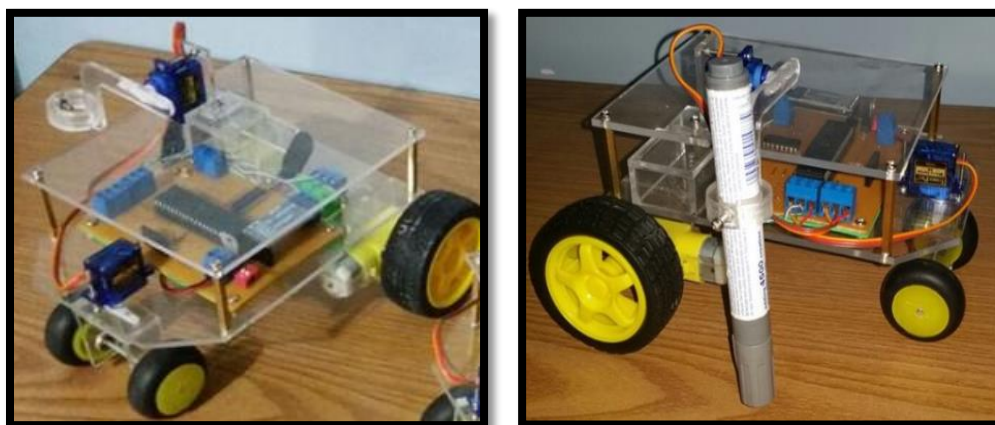


Figura 80: Primer prototipo plataforma móvil

Resultados

El problema detectado se debe a la falta de un correcto acople entre cada llanta lateral y el motor DC que la controlaba, lo que produce que el carro no pueda avanzar o retroceder en línea recta. Se corrige este problema, cambiando el diseño y configuración de la plataforma, donde se realizó los acoples necesarios para la correcta sujeción de cada uno de los elementos que la conforman. Sin olvidar que la factibilidad de control con la configuración de la plataforma escogida, hacía que el mismo fuera más extenso y complicado, por ello optamos por un robot móvil diferencial. Además del cambio de motores DC a servomotores de rotación continua y acompañados de encoders incrementales, con ello obteniendo un control más sencillo y preciso para la planeación de trayectorias (figuras geométricas).

4.2.2. Segunda evaluación

En esta evaluación tuvo por objetivo controlar que se dé el correcto reconocimiento de la figura geométrica que el usuario elija por medio de la interfaz gráfica. Por ello en la detección de contornos se debe delimitar el área de trabajo, escoger los colores de HSV altos y bajos con sus variables de umbral correctas (saturación, valor, matiz) para el reconocimiento del color.

Resultados

Los resultados de esta prueba al principio no fueron los deseados, para poder corregir el problema que se nos presentaba debido a la cantidad de iluminación, provocando el incorrecto reconocimiento de una figura geométrica. Se opta por la construcción de una caja en acrílico oscuro para colocar la cámara conjuntamente con leds blancos de alta luminiscencia. Brindando así un espacio una iluminación adecuada y finalmente poder parametrizar

nuevamente los valores de HSV altos y bajos: saturación, valor y matiz, con sus valores mínimos y máximos correspondientes.

Asegurando el reconocimiento del color y contorno de la figura, sin confundir el círculo con el cuadrado el error más frecuente que se presentó, por tanto se delimitó el número de vértices es decir se aproximó el número de puntos de un contorno de la siguiente manera: 3 para el triángulo, 4 para el cuadrado y 5 para el círculo. Sin olvidarnos del escalamiento correcto de la imagen, al momento de delimitar el reconocimiento por el área de cada figura geométrica.

En la figura 81 se puede observar la selección del rango de HSV altos y bajos con sus valores máximos y mínimos respectivamente, para el correcto reconocimiento del color rojo.

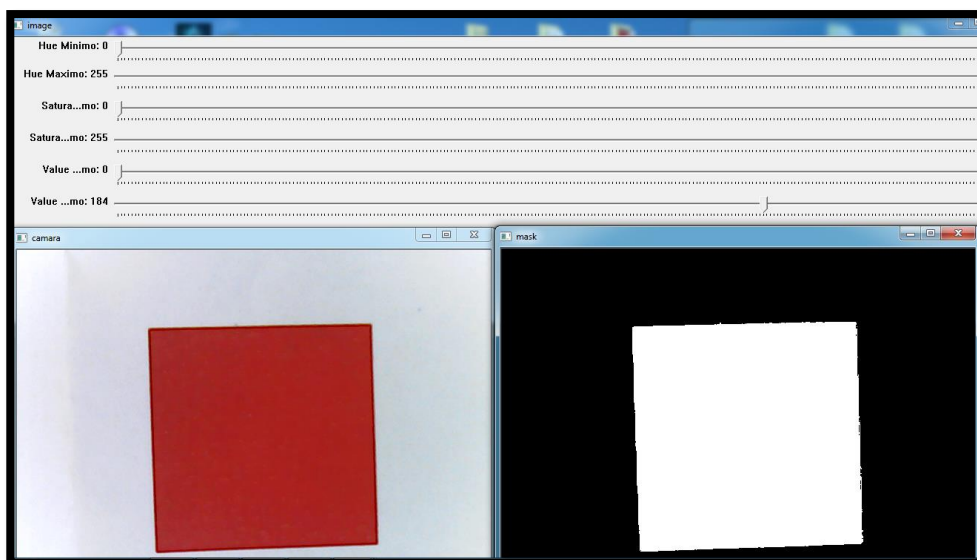
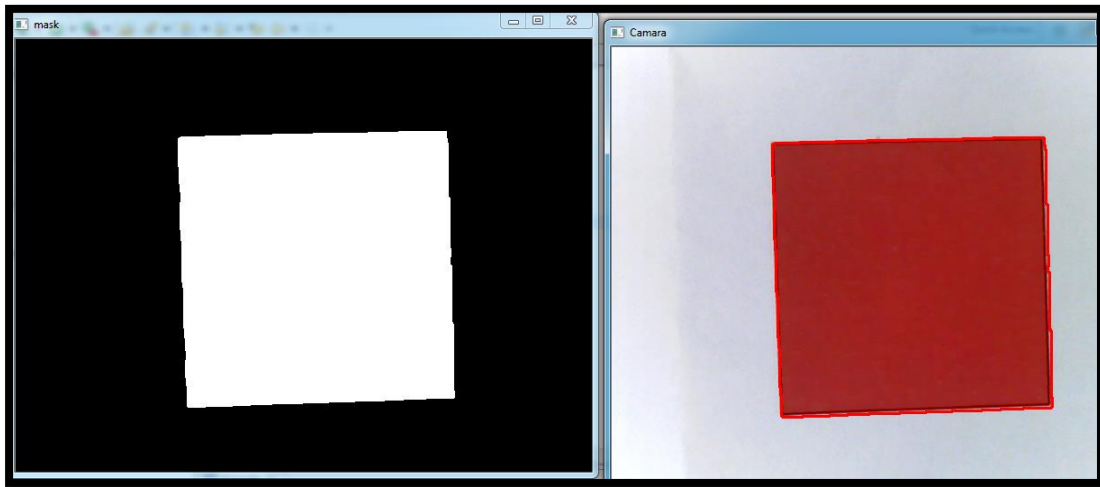


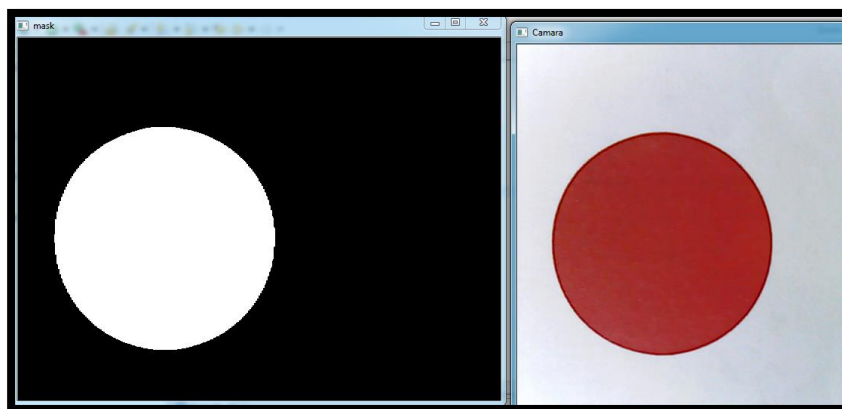
Figura 81: Segmentación de color HSV

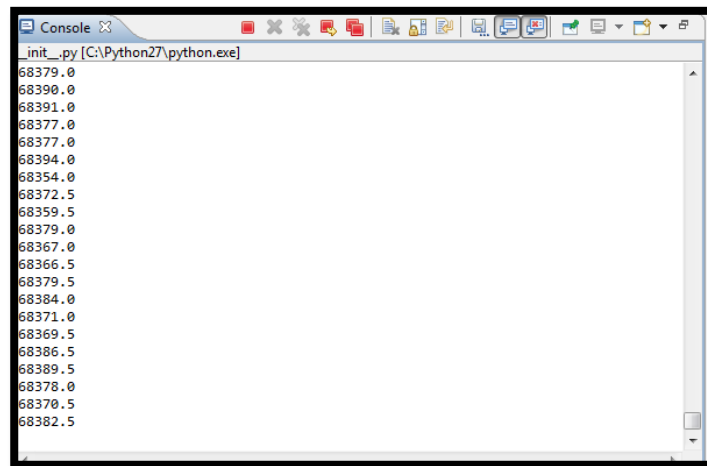
En la figura 82 a la 84 se puede observar el cálculo del área de trabajo, de cada una de las figuras geométricas para asegurar el correcto reconocimiento del contorno, ya que mediante el se delimita el área de trabajo mínima.



```
Console [C:\Python27\python.exe]
__init__.py [C:\Python27\python.exe]
89661.0
89621.5
89668.0
89648.0
89651.0
89731.0
89647.0
89649.5
89634.5
89638.5
89643.0
89653.0
89718.0
89600.5
89651.5
89647.5
89688.5
89664.0
89667.5
89708.0
89720.5
89666.5
```

Figura 82: Cálculo del área _figura geométrica (cuadrado)



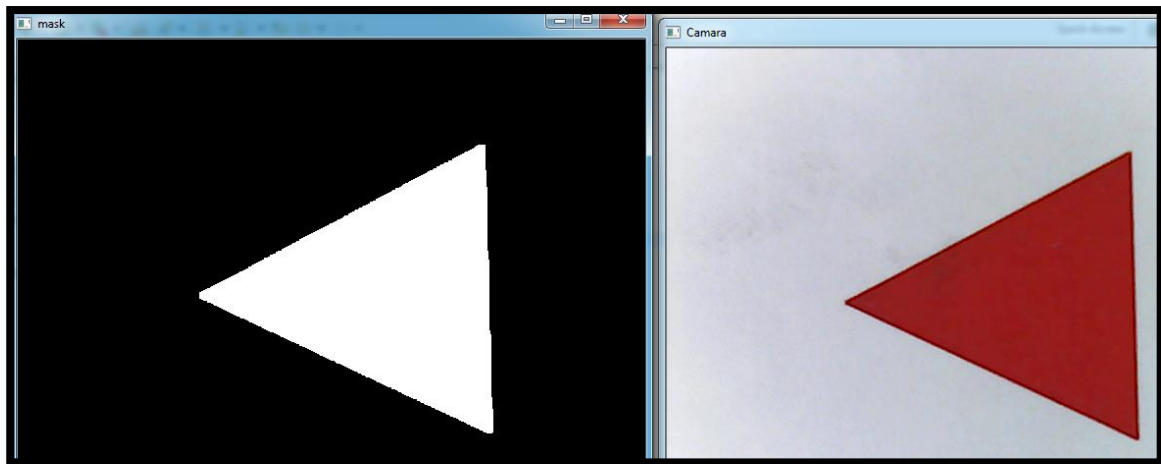
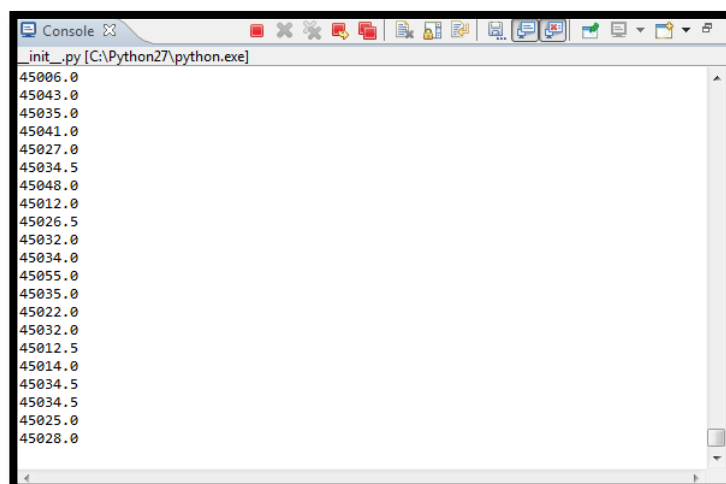


```

Console [C:\Python27\python.exe]
__init__.py [C:\Python27\python.exe]
68379.0
68390.0
68391.0
68377.0
68377.0
68394.0
68354.0
68372.5
68359.5
68379.0
68367.0
68366.5
68379.5
68384.0
68371.0
68369.5
68386.5
68389.5
68378.0
68370.5
68382.5

```

Figura 83: Cálculo del área _figura geométrica (círculo)

```

Console [C:\Python27\python.exe]
__init__.py [C:\Python27\python.exe]
45006.0
45043.0
45035.0
45041.0
45027.0
45034.5
45048.0
45012.0
45026.5
45032.0
45034.0
45055.0
45035.0
45022.0
45032.0
45012.5
45014.0
45034.5
45034.5
45025.0
45028.0

```

Figura 84: Cálculo del área _figura geométrica (triángulo)

4.2.3. Tercera evaluación

En esta evaluación se analiza el desempeño de las dos plataformas diferenciales para la realización de figuras geométricas a través del trabajo cooperativo, siendo controladas por medio de una interfaz gráfica para que la interacción con el usuario sea sencilla y amigable.

En dicha interfaz el usuario puede seleccionar el número de robots para trazar la trayectoria de una figura geométrica, seguido del reconocimiento de la misma a través de la visión artificial y finalmente iniciar la secuencia de planeación previa para el trazo de la figura.

Resultados

Se observa que al momento de comenzar la secuencia de trazado de una de las tres figuras geométricas, las llantas laterales se deslizaban sobre la superficie de contacto escogida. Inicialmente se seleccionó vidrio para realizar las pruebas de trazado y además las plataformas trazaban la figura geométrica distorsionada, con un margen de error alto como podemos observar en la figura 85.

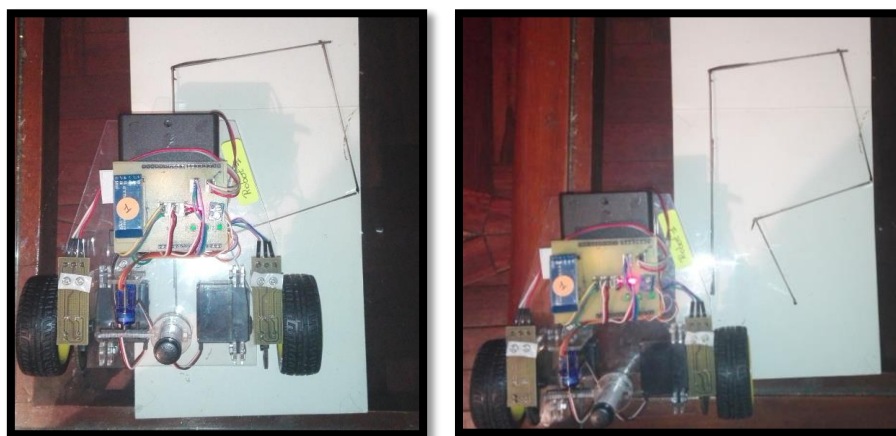


Figura 85: Trazo cuadrado con un robot

Para poder corregir el error antes mencionado se realiza nuevas pruebas, pero en este caso la superficie de deslizamiento escogimos liga. Obteniendo resultados muy buenos y teniendo un margen de error pequeño, ya que las llantas traseras tenían una mejor adherencia a la superficie de contacto. Con ello se asegura que la figura geométrica trazada tenga un error aceptable del 5 %.

A continuación se muestra una galería de imágenes de la figura 86 a la 91 con el trazado de las tres figuras geométricas con uno y dos robots:

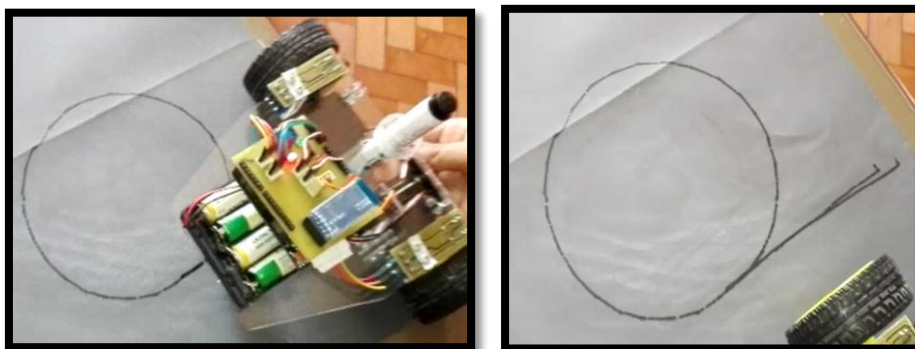


Figura 86: Trazo de un círculo con un robot

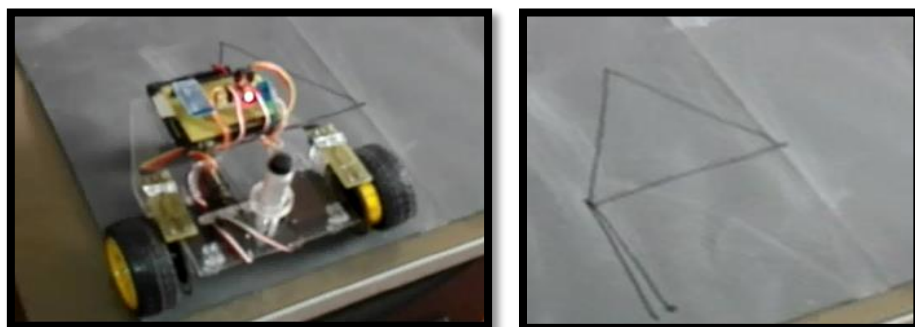


Figura 87: Trazo de un triángulo con un robot

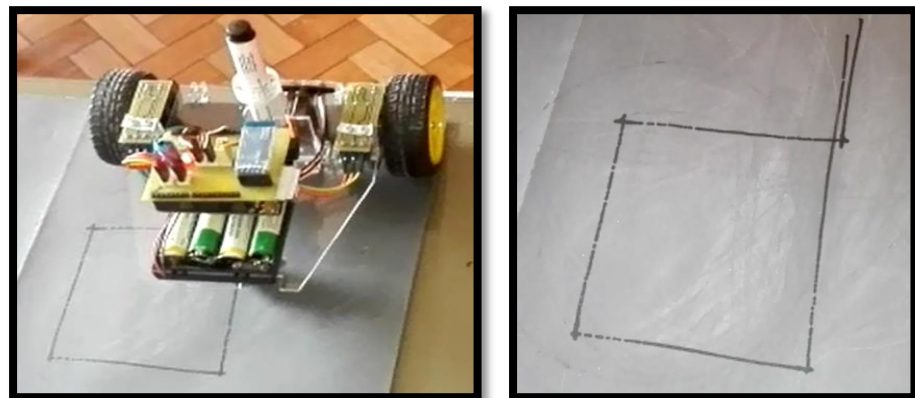


Figura 88: Trazo de un cuadrado con un robot



Figura 89: Trazo de un cuadrado con dos robots

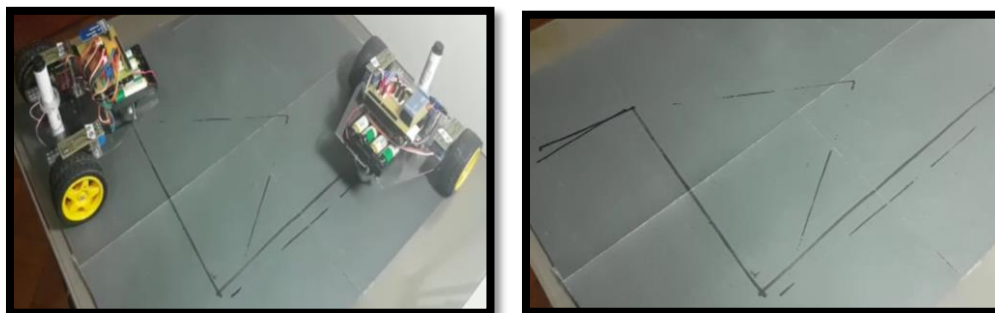


Figura 90: Trazo de un triángulo con dos robots

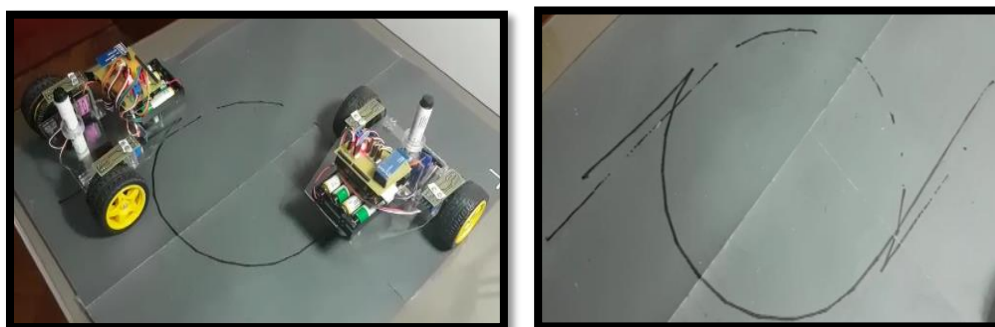


Figura 91: Trazo de un círculo con dos robots

Además se muestra los errores obtenidos de la tabla 37 a la 41 mostrando la efectividad de la planeación y ubicación previa (off line) y la funcionalidad del sistema de control mediante la visión artificial en el trazado final de las tres figuras geométricas básicas.

Tabla 36:
Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria cuadrada con un robot

Nº Dato	X teórico (cm)	X real (cm)	Error X %	Y teórico (cm)	Y real (cm)	Error Y %
1	0	0	0	9	8.5	5.56
2	0	0	0	19.5	18.5	5.13
3	10.5	10.5	0	19.5	18.5	5.13
4	10.5	11	4.76	9	8.5	5.56

Tabla 37:
Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con un robot

Nº Dato	X teórico (cm)	X real (cm)	Error X %	Y teórico (cm)	Y real (cm)	Error Y %
1	0	0	0	9	8.5	5.56
2	7.5	7	6.67	23	22	4.35
3	15	14	6.67	9	8.5	5.56

Tabla 38:
Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria cuadrada con dos robots

Nº Dato	X teórico (cm)	X real (cm)	Error X %	Y teórico (cm)	Y real (cm)	Error Y %
1	0	0	0	9	8.5	5.56
2	0	0	0	33.5	33	1.5
3	25	24.5	2	33.5	33	1.5
4	25	24	4	9	8.5	5.56

Tabla 39:
Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con dos robots

Nº Dato	X teórico (cm)	X real (cm)	Error X %	Y teórico (cm)	Y real (cm)	Error Y %
1	0	0	0	9	8.5	5.56
2	12.5	12.25	2	34	34	0
3	25	24.5	2	9	8.5	5.56

Tabla 40:
Tabulación de datos para el cálculo de errores para la trayectoria triangular con dos robots

Nº Dato	D teórico (cm)	D real (cm)	Error D %
1	10.5	10	4.76
2	25	24.5	2

4.3. Resumen

- La construcción de las dos plataformas diferenciales se inicia desde el corte de cada una de sus componentes en acrílico, seguido del ensamblaje y acople de actuadores para pasar a la etapa de implementación electrónica y eléctrica y posterior la implementación del control con Open CV, terminando con la interfaz gráfica para el usuario.
- Las pruebas de funcionamiento de las plataformas móviles se realiza en tres etapas. La primera evaluación realizada a la plataforma móvil, se hizo una vez construidas y ensambladas todas sus partes. La cual consistió en la verificación de factibilidad de control así como el correcto diseño de juntas de acople entre el eje de las llantas y el servomotor, en donde se escogió como la mejor configuración a la diferencial por su factibilidad de control y finalmente para el control de las llantas laterales a servomotores de rotación continua debido a su precisión y libertad de giro.

- En la segunda evaluación tuvo por objetivo controlar que se dé el correcto reconocimiento de la figura geométrica que el usuario elija por medio de la interfaz gráfica. Por ello en la detección de contornos se debía delimitar el área de trabajo, escoger los colores de HSV altos y bajos con sus variables de umbral correctas (saturación, valor, matiz) para el reconocimiento del color.
- La tercera evaluación, consiste en la simulación de formación de figuras geométricas mediante el trabajo cooperativo empleando la interfaz gráfica diseñada (HMI). Comprobamos que la superficie de desplazamiento de las plataformas móviles es de suma importancia así como el torque de cada servomotor ya que al patinar las llantas no podrá realizar la figura de manera adecuada. Y en cada giro que se realice para alcanzar una posición deseada, va ir acarreado ese error que a la final se ve reflejado de manera cuantitativa en el tamaño y forma de la figura geométrica. Por tanto se utilizó liga, ya que muestra una mejor adherencia de las llantas a la superficie de contacto. Lo que nos permite realizar las pruebas necesarias de verificación del correcto trazado de las tres figuras geométricas con uno o dos robots.

Capítulo 5

Análisis de costos

Se verifica la rentabilidad del presente proyecto para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además se realiza un análisis de costos directos, indirectos tanto de fabricación, ensamble y puesto en marcha del mismo.

5.1. Análisis financiero

En el cual se tomara en cuenta tres aspectos muy importantes analizar en el presente capítulo:

- Costos Directos
- Costos indirectos
- Costos de producción

5.1.1. Costos indirectos

Es el conjunto de gasto que adquiere una empresa determinada, que está relacionado directamente con la obtención de un servicio o producto el cual se desarrolló en torno a la actividad que realiza la empresa. Por ello afecta en la determinación del precio de venta del producto al público.

Por tanto se detallara a continuación los siguientes costos:

- Materiales eléctricos y electrónicos
- Materia prima para la estructura mecánica
- Complementos para la estructura mecánica
- Complementos eléctricos y electrónicos

5.1.1.1. Costos de materiales directos

Tabla 41:
Costos materiales eléctricos y electrónicos

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Costo total
Parallax (Futaba S148) Continuous Rotation Servo	4	35	140
TermoPro Mini servo SG90	2	6	12
Arduino UNO R3 con cable USB	2	15	30
Encoder	4	7	28
Portabaterías	2	8	16
Baterías recargables	8	2	16
Total			242

Tabla 42:
Complementos electrónicos y eléctricos

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Costo total
Cables para Arduino	2	5	10
Borneras	6	1	6
Estaño	2	5	10
Pasta para soldar	1	3	3
Papel termotransferible	2	1.50	3
Baquelita	2	7	14
Brocas	2	1	2
Cautín	1	8	8
Ácido	3	0.50	1.50
Cámara web	1	20	20
Módulo Bluetooth	2	9	18
Total			95.5

Tabla 43:
Materia prima estructura mecánica

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Costo total
Piezas de acrílico	52	1.55	80.6
Total			80.6

Tabla 44:
Complementos la estructura mecánica

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Costo total
Tuercas y tortilla's M3	24	0.3	7.20
Separadores hexagonales	4	1	4
Rueda Loca	2	2	4
Llantas de goma	4	5	20
Pegamento para acrílico	1	10	10
Marcador	2	2.50	5
Total			50.2

Tabla 45:
Costos de complementos

Descripción	Costos
Complementos eléctricos y electrónicos	95.5
Complementos para estructura	50.2
Total	145.7

Tabla 46:
Costos totales directos de materiales

Descripción	Costos
Elementos eléctricos y electrónicos	242
Elementos para la estructura	80.6
Accesorios	145.7
Total	468.3

5.1.1.2. Costos de mano obra directa

En los costos de mano obra directa se considera todas las personas que forman parte del diseño, construcción y montaje del presente proyecto, aquí se incluirá la mano de obra del corte del acrílico para la estructura de los robots móviles como se observa en la tabla 48.

Tabla 47:
Costos de mano de obra directa para la fabricación de la plataforma diferencial

Persona a cargo	Actividad	Días	Horas
Tesista	Diseño de la plataforma móvil	15	40
	Generación de planos	4	8
	Montaje	2	5
	Compra de materiales y accesorios	7	4
Accesor (Director del Proyecto)	Revisión y aprobación de planos de diseño	2	2
Total		30	59

En el diseño, construcción y montaje del proyecto se utiliza 10 semanas de las cuales se utiliza 57 horas para el desarrollo de la plataforma.

Por tanto se procede a realizar un análisis de los costos de mano de obra de cada una de las personas que realizaron aportes en el proyecto lo que se puede visualizar en la tabla 49, para ello consideraremos que el sueldo básico de un tesista es de 370 dólares y eso dividido para ocho horas diarias y 5 días laborables a la semana el costo por hora es de \$ 2.32; y para el caso del accesor del proyecto su salario básico es de 2100 y el costo por hora es \$ 13.13.

Tabla 48:
Costo de mano obra directa para la fabricación de la plataforma diferencial

Descripción	Horas	Costo por hora	Costo total
Tesista	57	2.32	132.24
Accesor (Director del Proyecto)	2	13.13	26.26
Total			158.5

5.1.1.3. Costos directos totales

A continuación se detalla en la tabla 50 todos los costos directos usados en nuestro proyecto.

Tabla 49:
Costos directos totales para la fabricación de la plataforma diferencial

Descripción	Costo
Materiales	468.3
Mano de obra	158.5
Total	626.8

5.1.2. Costos indirectos

Se refieren a todos los costos que no interactúan en la elaboración de un sistema, sin dejar de ser importantes en la realización del mismo.

5.1.2.1. Costos de materiales indirectos

Tabla 50:
Costos de materiales indirectos para la fabricación de la plataforma diferencial

Descripción	Días	Horas	Costo por hora	Costo total
Electricidad	120	960	0.08	76.8
Internet	120	960	0.06	57.6
Herramientas	120	960	0.1	96
Total				230.4

5.1.2.2. Costos de mano de obra indirecta

Tabla 51:
Costos de mano de obra indirecta para la fabricación de la plataforma móvil

Descripción	Horas	Costo por hora	Costo total
Corte por láser acrílico	16	2.50	40
Asesoramiento técnico	40	15	600
Total			640

5.1.2.3. Costos totales indirectos

Se presenta a continuación un resumen de todos los costos indirectos totales para la implementación de los robots móviles los cuales forman figuras geométricas y el trazado de la trayectoria descrita.

Tabla 52:
Costos indirectos totales

Descripción	Costo
Costo de material indirecto	230.4
Costo de mano de obra indirecta	640
Total	870.4

5.1.3. Costos totales

Es el resultado de la sumatoria de los costos directos más los indirectos tomando en consideración todo lo que se requiere para el proyecto tanto como materiales y mano de obra y se detalla en la tabla 54.

Tabla 53:
Costos totales del proyecto

Descripción	Costo
Costos directos	626.8
Costos indirectos	870.4
Total	1497.2

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

En el capítulo se detalla las conclusiones y recomendaciones que se obtienen a lo largo del presente proyecto.

6.1. Conclusiones

- Se desarrolla un sistema de generación de figuras geométricas básicas (cuadrado, círculo y triángulo) a través del trabajo cooperativo que permite la ubicación de dos robots móviles en puntos específicos. Mediante el desarrollo del control en base a matrices de rotación para tracción diferencial, y el acompañamiento de la visión artificial. Para el reconocimiento y diferenciación del contorno y color de cada figura que se realice, conjuntamente con una interfaz gráfica que le permita al usuario escoger que figura desea que tracen en conjunto.
- Se realiza el diseño de un sistema mecánico que permite optimizar el desempeño de cada robot móvil por medio del estudio de varios tipos de configuración escogiendo la tracción diferencial como la mejor opción y ya que presenta menos problemas en la locomoción del robot móvil, permitiendo la factibilidad de seguir una trayectoria recta y un radio de giro casi nulo sobre sí mismo, trazando curvas para alcanzar la trayectoria deseada. Teniendo como único inconveniente el equilibrio de la plataforma, el cual se soluciona adicionando una rueda loca, la misma que sirve como apoyo adicional a las ruedas laterales. Además un beneficio de este tipo de configuración es que al venir dado por unas diferencias de velocidades de las ruedas traseras, montadas en un eje único son controladas de manera independiente, brindando al robot tracción y direccionamiento simultaneo.
- Se diseña un sistema eléctrico y electrónico obteniendo como resultado un nivel de autonomía alto para cada plataforma móvil y así adaptándose a su entorno, por medio de una comunicación vía bluetooth con la computadora

central la cual le indica que tipo de trayectoria debe trazar y el punto de inicio para realizar el trabajo de manera conjunta con la otra plataforma móvil. Con la ayuda de la visión artificial realizada a través de Open CV se puede reconocer y diferenciar cada figura que se desea trazar. No se presenta inconvenientes relacionados con la realización de una tarea antes ejecutada por su compañero de trabajo o a su vez que no se realice la actividad por la desorientación de uno de los dos robots móviles. Ya que se realiza una planeación previa es decir una resolución off line de cada figura geométrica a ser desarrollada obteniendo un error menor al 5% en el trazo de cada figura de manera cooperativa.

- Para la comunicación de la plataforma móvil con la computadora central se utiliza el protocolo de comunicación inalámbrica bluetooth para el envío y recepción de las posiciones que son tomadas por cada robot, ya que su velocidad de transmisión de datos es de 9600 bps la misma que se puede mejorar a través de una red Wi-Fi ya que puede brindar una transmisión mucho más alta de 22Mbps. Además la comunicación inalámbrica trabaja con un modelo jerárquico de 3 niveles: maestro-esclavo-esclavo. Brinda grandes ventajas, ya que se eliminan los cables y es mucho más económica, eficiente en comparación con otro tipo de comunicación.
- Para finalizar se destaca la importancia del presente proyecto en la generación de líneas de investigación futuras en el campo de la robótica cooperativa para facilitar las tareas complejas y la visión artificial para el reconocimiento de colores y contornos de figuras geométricas. Por tal motivo es importante seguir con nuevas investigaciones y proyectos sobre el tema desarrollado y contribuir con el desarrollo tecnológico a nivel institucional.

6.2. Recomendaciones

- Para mejorar el trazo de las trayectorias de las tres figuras geométricas básicas, es necesario un análisis más a detalle de la superficie de trabajo, así como el coeficiente de rozamiento entre las llantas de la plataforma móvil, la rueda y la superficie de contacto. Permite tener un error más confiable en el momento de trazar las mismas, sin olvidar que la rueda loca a pesar que su función es dar

equilibrio a la estructura. También puede generar una fuerza de oposición al movimiento articulado por las dos llantas traseras.

- En la detección de las figuras geométricas, para tener un reconocimiento tanto de color como de contorno adecuado, se debe considerar que la posición de la cámara debe estar en un lugar o ambiente de iluminación regulada así como delimitar el área de detección de las mismas. Caso contrario se tendrá detecciones erróneas entre las figuras.
- Tomar en cuenta que el tipo de protocolo de comunicación que se utiliza para el envío de datos a la central y como la encargada de tomar las decisiones, necesita habilitar varios puertos seriales de comunicación caso contrario se puede tener problemas en la realización de la tarea encomendada a dicha plataforma diferencial. Para trabajos futuros se podrá desarrollar una arquitectura de control descentralizada porque las plataformas diferenciales actúan de manera independiente tan solo por la percepción de su entorno evitando el envío y almacenamiento de datos en una central es decir sin la necesidad de recibir órdenes externas, y con autonomía por completo, para ello se puede utilizar una Raspberry Pi un computador de placa reducida evitando así el uso de una computadora central la cual implica un costo mucho más alto.
- Para poder mejorar la planeación de la trayectoria off line, podemos realizar un control de velocidad para que las llantas traseras pueden desplazarse en línea recta y asegurar que el robot móvil gire sobre su propio eje para alcanzar una posición deseada. Disminuyendo el error en el trazo de figuras geométricas. Para trabajos futuros se podrá corregir la odometría por medio de la visión artificial y el reconocimiento de objetos en movimiento logrando reducir dicho error, por tanto se elimina la posibilidad de que un robot móvil no concluya con éxito la tarea encomendada y sin lugar a duda se puede complementar con que si una plataforma móvil se pierde y no realiza su trabajo, la otra finalice dicha tarea.

BIBLIOGRAFÍA

ETITUDELA. (12 de diciembre de 2016). Obtenido de <http://www.etitudela.com/celula/downloads/visionartificial.pdf>

Hobby Model. (26 de Julio de 2016). Obtenido de Tienda de radio control y modelismo: <http://www.hobbymodel.es/accesorios/312-micro-servo-sg90-9g.html>

NAYLAMP Mechatronics. (26 de julio de 2016). Obtenido de <http://www.naylampmechatronics.com/motores-dc/20-motor-dc-caja-reductora-y-llanta-goma.html>

SHARP. (16 de diciembre de 2016). Obtenido de <http://voron.ua/files/pdf/optopara/pc817xx.pdf>

Vision artificial e interaccion sin mandos. (12 de diciembre de 2016). Obtenido de <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/>

Aberron. (09 de Noviembre de 2008). *Fogonazos*. Obtenido de <http://www.fogonazos.es/2008/11/enjambre-de-robots-al-rescate.html>

ALAMI, F. (1998). *Multi Robot cooperation in the MARTHA project*. Autom Mag.

American, B. (26 de Junio de 2011). *cyberneticzoo*. Obtenido de <http://cyberneticzoo.com/tag/mobile-robot/page/3/>

APOLO, A., & VELASCO, A. (2013). *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ROBÓTICA COOPERATIVA ENTRE DOS ELEMENTOS ROBOTS TIPO ROBONOVA*. SANGOLQUI.

Becerra, J. (Febrero de 2016). *Introducción a Wiring PI en Raspberry PI*. Obtenido de <http://blog.hunabsys.com/introduccion-a-la-raspberry-pi-puertos-y-wiring-pi/>

BROOKS R.A. (1986). *A robust layered control system for a mobile robot*. USA: IEEE Robot Autom.

Cajamarca, M., & Chancusig, L. (2015). *Diseño de un catálogo con ilustraciones digitales para el mejoramiento del diseño artesanal en el área de la cerámica, vidriería y marmolería en la provincia de Cotopaxi*. Latacunga.: Universidad Técnica de Cotopaxi.

- CARDENAS, N., & SIMBAÑA, G. (2007). *Diseño y construcción de un robot móvil didáctico para estudios experimentales de robótica cooperativa*. QUITO: Universidad Politecnica Salesiana.
- Cazco, R., & Gordon, D. (2015). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA CNC DE CORTE POR LÁSER EN LÁMINAS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF DE HASTA 6mm DE ESPESOR*. Sangolqui: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Champions, R. 2. (2015). *School of Computer Science*. Obtenido de <http://www.cs.cmu.edu/~robosoccer/small/>
- CHILEROBOTICS. (2014). *SCIELO*. Obtenido de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052014000300014&script=sci_arttext
- Clausing. (2003). *Quality Funtion Deployment (QFD)*.
- Conrad G., M., & Mae, R. (1970). *Luz y visión*. Holanda: Time-Life International.
- Díaz, F. (Agosto de 2008). *Programación automática de máquinas CNC*. Obtenido de http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf
- Escalante R., B. (Agosto de 2006). *Procesamiento Digital de Imágenes*. Obtenido de verona.fi-p.unam.mx: <http://verona.fi-p.unam.mx/boris/teachingnotes/Introduccion.pdf>
- FESTO. (2015). *EDUTELSA*. Obtenido de <http://edutelsa.com/festo/>
- FESTO. (27 de Marzo de 2015). *IEEE SPECTRUM*. Obtenido de <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/festo-bionic-ants-and-butterflies>
- GECCO. (30 de Junio de 2004). *Genetic Programming*. Obtenido de <http://www.genetic-programming.com/johnkozapicture.html>
- Hernández, L. (2014). *Vectorización de imágenes*. Obtenido de <http://sinlios.com/blog/2013/07/20/como-vectorizar-una-imagen-de-manera-sencilla/>
- INKSCAPE. (2016). *Inkscape.org*. Obtenido de <https://inkscape.org/en/>
- Levenspiel, O. (1993). *Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor*. Reverte.

- Lira, J. (1987). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. México D.F.: La Ciencia para todos.
- Logo-arte. (2015). *Vectorización de imágenes*. Obtenido de <http://www.logo-arte.com/vect4.htm>
- Maiman, K. (2010). *Laser Inventor*. Obtenido de <http://www.laserinventor.com/contact.html>
- MASON, M. T. (1985). *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*. London, Great Britain.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas*. EL Castillo.
- MCLOUGHLIN. (1 de Agosto de 2015). *ABC Technology*. Obtenido de <http://www.abc.es/tecnologia/informatica-software/20150801/como-aprenden-maquinas-201508010726.html>
- Midstorms, L. (15 de Octubre de 2013). *La Grulla Libre*. Obtenido de <https://lagrullalibre.wordpress.com/2013/10/15/un-recorrido-por-la-robotica-en-educacion/>
- Moeslund, T. B. (2012). *Introduction to Video and Image Processing*. Springer-Verlag London Limited.
- MOLINA, M. V. (2014). *Flotilla de Robots para trabajos en Robotica Cooperativa*. Bogota: Universidad Militar Nueva Granada.
- MOLINA, M., & RODRIGUEZ, E. (2014). *FLOTILLA DE ROBOTS PARA TRABAJOS EN ROBOTICA COOPERATIVA*. Universidad Nueva Granada Bogotá-Colombia.
- Molina, M., & Rodriguez, E. (2014). *Flotilla de robots para trabajos en robótica cooperativa*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- NAONE, E. (20 de 06 de 2001). *MIT Technologic Review*. Obtenido de Enjambres robòticos: <http://www.technologyreview.es/robotica+coopertiva>
- NASA. (2015). *Nasa.gov*. Obtenido de https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html
- Nisbett, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México.
- O'Brien, R. (1966). *Máquinas*. México: Offset Multicolor.

- Oxford, R. M. (1998). *Caution Robot Vehicle*. Obtenido de <http://www.frc.ri.cmu.edu/~hpm/book98/fig.ch2/p018.html>
- PROEN, P. (Noviembre de 2011). *PROEN S.A.* Obtenido de <https://proyectovisionartificial.wordpress.com/diagrama-de-bloques/>
- PROYECT-ROBOT. (2014). *Barcelona Moon Team*. Obtenido de <http://www.barcelonamoonteam.com/018-rovertwo-r05-research/>
- RoboCup. (1999). *RoboCup*. Obtenido de <http://www.robocup.org>
- Robotic-Zoo, G. (06 de Mayo de 2013). *Bizatacora*. Obtenido de <http://bizatacora.blogspot.com/2013/05/robots-zoomorficos.html>
- RUS, D. (1995). *Human Robot Interaccional Cooperative Robots*. Marsella: IROS.1995.525802.
- Saiz J., J. (2012). *Transferencia de calor*. Coruña: Universidade da Coruña.
- Sánchez, J. h. (22 de 12 de 2016). *Técnicas modernas en automática, Parte: III "Robótica"*. Obtenido de <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/TMA-RoboticaJHS.pdf>
- Schawlow, A. L. (1969). *Lasers and Light*. San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- Smits, A. (2007). *Turbulence in pipes: The Moody diagram, and Moore's Law*. San Diego: Princeton University.
- SUIZA ROBOTICS. (Noviembre de 2015). *CMI*. Obtenido de <http://www.cmi.com.co/robotica-anticipara-intenciones-humanas-y-procesara-ordenes-cerebrales>
- SWARMANOID. (2011). *ACTUALIDAD GADGET*. Obtenido de <http://www.actualidadgadget.com/swarmanoid-robots-cooperativos/>
- Systems, K. (Febrero de 2010). *Defying the laws of fulfillment system*. Obtenido de Kiva Systems: <http://www.kivasystems.com/brouche/KivaLaws-Webprint.pdf>
- TABANGO, R. (2014). *Desarrollo de un sistema de robotica cooperativa con procesamiento centralizado entre dos robots humanoides Bioloid Premiun*. Sangolqui.

- Trotec. (2015). *Cortadora Láser*. Obtenido de <http://www.troteclaser.com/es-ES-ES/maquinas-laser/Pages/cortadora-laser-sp.aspx>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- ULRICH, K., & EPPINGER, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Mexico: MC Graw Hill.
- USIÑA, G., & PALAQUIBAY, P. (2014). *Control cooperativo de robots utilizando FPGA's*. QUITO: Escuela Politecnica Nacional.
- UVIGO. (2014). *Óptica de Fourier. Procesamiento óptico de imágenes*. Obtenido de http://www.laser.uvigo.es/Docencia/Teleco/Fav.05/pdf/Practica5_05.pdf
- VALLEY, S. (18 de Abril de 2015). *ICV PROYECTS*. Obtenido de <http://icvdecreixement.blogspot.com/2016/04/por-que-en-silicon-valley-se-estan.html>
- Waveshare. (s.f). *7inch HDMI LCD*. Obtenido de [http://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_\(B\)](http://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_(B))
- Zahumenszky, C. (14 de Agosto de 2014). *GIZMODO*. Obtenido de <http://es.gizmodo.com/cientificos-de-harvard-crean-un-enjambre-cooperativo-de-1621754863>
- ZAHUMENZKY. (08 de Agosto de 2014). *GIZMODO*. Obtenido de <http://es.gizmodo.com/cientificos-de-harvard-crean-un-enjambre-cooperativo-de-1621754863>

ANEXOS

**ANEXO A:
PLANOS DE COMPONENTES MECÁNICOS Y ENSAMBLE FINAL**

ANEXO B:

DATASHEETS _ HOJAS TÉCNICAS DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS