



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
MULTIROBOT DESCENTRALIZADO PARA REALIZAR TRABAJO
COLABORATIVO CON APLICACIONES LOGÍSTICAS, FLEXIBLES Y
ESCALABLES**

AUTORES: AGUIRRE AYMARA, BRYAN GABRIEL

MOYANO CABEZAS, CRISTIAN JAVIER

DIRECTOR: ING. ESCOBAR CARVAJAL, LUIS FERNANDO

SANGOLQUÍ, ECUADOR

2019



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTIROBOT DESCENTRALIZADO PARA REALIZAR TRABAJO COLABORATIVO CON APLICACIONES LOGÍSTICAS, FLEXIBLES Y ESCALABLES**” fue realizado por los señores **AGUIRRE AYMARA BRYAN GABRIEL** y **MOYANO CABEZAS CRISTIAN JAVIER**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 4 de febrero del 2019

Ing. ESCOBAR CARVAJAL LUIS FERNANDO

Director

C.C.: 1002403200

C.C.: 1002403200



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **AGUIRRE AYMARA BRYAN GABRIEL** con cédula de identidad N° 1718078981 y **MOYANO CABEZAS CRISTIAN JAVIER** con cédula de identidad N°1722194667, declaramos que este trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTIROBOT DESCENTRALIZADO PARA REALIZAR TRABAJO COLABORATIVO CON APLICACIONES LOGÍSTICAS, FLEXIBLES Y ESCALABLES" es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 4 de febrero de 2019

Firman:



AGUIRRE AYMARA
BRYAN GABRIEL
C.C.: 1718078981



MOYANO CABEZAS
CRISTIAN JAVIER
C.C.: 1722194667



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **AGUIRRE AYMARA BRYAN GABRIEL** y **MOYANO CABEZAS CRISTIAN JAVIER** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTIROBOT DESCENTRALIZADO PARA REALIZAR TRABAJO COLABORATIVO CON APLICACIONES LOGÍSTICAS, FLEXIBLES Y ESCALABLES" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 4 de febrero de 2019



AGUIRRE AYMARA
BRYAN GABRIEL
C.C.: 1718078981



MOYANO CABEZAS
CRISTIAN JAVIER
C.C.: 1722194667

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia, a la academia, a mis docentes, a todos los que fueron parte de mi vida universitaria y a la patria.

Bryan Gabriel Aguirre Aymara

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Mercedes y Juan, quienes han sabido inculcarme valores desde pequeño con su ejemplo y dedicación, quienes han sido pilar fundamental en mi vida, mi madre y su cariño, mi padre y su sacrificio, por quienes hoy soy la persona que soy y sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

Moyano Cabezas Cristian Javier

AGRADECIMIENTO

Agradezco especialmente a mis padres, que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a llegar a cumplir con este objetivo. A mi hermana por darme apoyo y acompañarme mientras cumplía con mis deberes y obligaciones de la carrera.

A toda mi demás familia que siempre han estado pendientes de mí, y cada vez que necesitaba una palabra de apoyo ellos me lo daban.

A mi novia y a su familia, que estuvieron pendientes de mí y compartieron este logro con orgullo a mi lado.

A todos mis amigos y compañeros de estudios que gracias a ellos la universidad ha sido una experiencia divertida y llevadera.

A mis docentes que traspasaron de la mejor manera su conocimiento hacia mí y espero no defraudarlos.

Finalmente agradezco al país entero, estudié en una universidad pública y estoy consciente que todos los ecuatorianos aportaron con un granito de arena.

Bryan Gabriel Aguirre Aymara

AGRADECIMIENTO

A Dios, por el regalo de la vida y poder maravillarme de todo lo que me rodea.

A mis padres, por ser siempre un apoyo, y procurar que nunca me falte nada.

A mis hermanos, Luis y Juan por brindarme su apoyo.

A mi familia, de manera especial a mi abuelita Inés y a mi tía Patricia, por su cariño incondicional.

A mis amigos, quienes acompañaron he hicieron más fácil todo este camino.

A mis tutores, por su confianza y saber guiarme en los ámbitos académicos.

A mis maestros, por la dedicación en su labor e impartirme los conocimientos.

A todos quienes han colaborado de alguna manera para poder llegar a donde estoy ahora.

Gracias.

Moyano Cabezas Cristian Javier

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
CÁPITULO I GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Importancia y Justificación	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
1.4. Alcance.....	7
1.5. Estructura del documento	8
CÁPITULO II ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Robótica Móvil.....	9
2.2. Elemento de locomoción	13
2.3. Navegación.....	13
2.4. Estimación de Posición	13
2.4.1. Estimación Basada en Medidas Internas	14

2.5.	Sistemas Multirobots.....	16
2.6.	Red de Comunicación	16
2.7.	Robótica Colaborativa.....	19
CÁPITULO III METODOLOGÍA Y DISEÑO		21
3.1.	Introducción.....	21
3.2.	Requerimientos del proyecto.....	23
3.2.1.	División de Subsistemas.....	23
3.3.	Subsistema Mecánico	24
3.3.1.	Arquitectura del Robot	24
3.3.2.	Ruedas del Robot Móvil.....	27
3.3.3.	Actuadores.....	36
3.4.	Subsistema Electrónico	44
3.4.1.	Sensores.....	45
3.4.2.	Tarjetas Electrónicas	50
3.4.3.	Diseño Electrónico	57
3.5.	Subsistema de Control.....	63
3.5.1.	Odometría.....	64
3.5.2.	Localización y navegación	68
3.5.3.	Controladores	70
3.6.	Subsistema TICs.....	77
3.6.1.	Implementación	78
3.6.2.	Node Red.....	79
3.6.3.	Flujogramas de funcionamiento interno.....	81
3.6.4.	Flujogramas de funcionamiento global	86
3.7.	Integración de Subsistemas	87
CÁPITULO IV RESULTADOS Y CONCLUSIONES		93

4.1.	Construcción e Implementación	93
4.1.1.	Hardware	93
4.1.2.	Software.....	95
4.2.	Pruebas de Funcionamiento.....	97
4.2.1.	Localización y Navegación	97
4.2.2.	Maniobrabilidad	105
4.2.3.	Comunicación de red.....	107
4.2.4.	Trabajo colaborativo.....	108
4.3.	Análisis de Resultados.....	111
5.1.	Conclusiones	113
5.2.	Recomendaciones	114
5.3.	Trabajos Futuros.....	114
	Bibliografía.....	116
	ANEXOS	124
	ANEXO A. MANUAL DE USUARIO	124
	ANEXO B. PLANOS.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Alcance del proyecto</i>	7
Tabla 2 <i>Linea de Tiempo de la robótica móvil</i>	9
Tabla 3 <i>Tipos de robot móviles por su medio de locomoción</i>	11
Tabla 4 <i>Sistemas de Red</i>	17
Tabla 5 <i>Especificaciones del proyecto</i>	23
Tabla 6 <i>Tipos de robots terrestres</i>	25
Tabla 7 <i>Arquitecturas de Robots con Ruedas</i>	26
Tabla 8 <i>Tipos de Ruedas</i>	28
Tabla 9 <i>Matriz de evaluación sobre el tipo de rueda</i>	29
Tabla 10 <i>Configuración de las Ruedas</i>	30
Tabla 11 <i>Tabla de desiciones</i>	33
Tabla 12 <i>Tipos de Ruedas Omnidireccionales</i>	33
Tabla 13 <i>Matriz de evaluación sobre ruedas omnidireccionales</i>	34
Tabla 14 <i>Requerimientos de los motores</i>	36
Tabla 15 <i>Opciones de actuadores DC</i>	37
Tabla 16 <i>Matriz de valoración para motores</i>	37
Tabla 17 <i>Parametros de actuador según catálogo</i>	39
Tabla 18 <i>Matriz de selección sensor de orientación</i>	49
Tabla 19 <i>Comparación de placas de arduino</i>	51
Tabla 20 <i>Matriz de selección de tarjetas de adquisición</i>	52
Tabla 21 <i>Características Arduino DUE</i>	53
Tabla 22 <i>Matriz de selección de tarjeta de control</i>	55
Tabla 23 <i>Características Raspberry Pi3 B+</i>	56
Tabla 24 <i>Tabla de consumo energético</i>	57
Tabla 25 <i>Velocidades en los ejes según su dirección</i>	68
Tabla 26 <i>Tabla comparativa de sistemas Operativos</i>	87
Tabla 27 <i>Elementos fabricados en el proyecto</i>	93
Tabla 28 <i>Tabla de costos</i>	94
Tabla 29 <i>Especificaciones técnicas</i>	95

Tabla 30 <i>Error en línea vertical</i>	99
Tabla 31 <i>Error en línea horizontal</i>	102
Tabla 32 <i>Error en línea diagonal</i>	102
Tabla 33 <i>Error en realizar una figura</i>	105

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Enjambre de robots, Robots kilobots.....	1
<i>Figura 2</i> Sistema multirobot.....	2
<i>Figura 3</i> Ilustración de los componentes de futbol robótico.....	3
<i>Figura 4</i> Robots móviles a) Dante I b) AIBO c) Asimo d) Shakey	10
<i>Figura 5</i> Robots terrestres a) Deslizante b) Rodante c) Caminantes d) Rulante.....	11
<i>Figura 6</i> Robot móvil KUKA omniMove	12
<i>Figura 7</i> Esquemas de las diferentes topologías de red.....	18
<i>Figura 8</i> Gráfica de crecimiento de robots colaborativos	19
<i>Figura 9</i> Modelo en V para metodología concurrente	22
<i>Figura 10</i> a) Deslizante b) Rodantes c) Caminantes d) Rulantes.....	25
<i>Figura 11</i> Configuración Ackerman.....	31
<i>Figura 12</i> Robot de alta tracción	31
<i>Figura 13</i> Robot diferencial	32
<i>Figura 14</i> Robots omnidireccionales a) 3 ruedas b) 4 ruedas o más.....	32
<i>Figura 15</i> Parámetros cinemáticos de una rueda Sueca	35
<i>Figura 16</i> Comparación de restricciones dinámicas.....	36
<i>Figura 17</i> a) Micro motor b) Planos micro motor	38
<i>Figura 18</i> a) Rueda sueca izquierda b) Rueda sueca derecha	40
<i>Figura 19</i> Diseño del micro motor	40
<i>Figura 20</i> Acople motor/rueda a) Vista frontal b) Vista superior	41
<i>Figura 21</i> Ensamblaje motor/acople/rueda.....	41
<i>Figura 22</i> Diseño del seguro del motor a la base del robot.....	42
<i>Figura 23</i> Diseño de la base del robot	42
<i>Figura 24</i> Ensamblaje de la base del robot móvil	43
<i>Figura 25</i> Modelo en V para validación del diseño	43
<i>Figura 26</i> Encoder de efecto hall	45
<i>Figura 27</i> Señal de efecto hall.....	46
<i>Figura 28</i> Orientación de un robot móvil.....	46
<i>Figura 29</i> Ángulos de un sensor IMU	47

Figura 30 Esquema del control por camara cenital	48
Figura 31 Mapeo con un sensor LIDAR	49
Figura 32 MyRio DAQ	50
Figura 33 Arduino DUE.....	52
Figura 34 Miniordenador Intel NUC.....	54
Figura 35 Raspberry Pi3.....	55
Figura 36 Raspberry modelo Pi3 B+.....	56
Figura 37 Especificaciones Puente H L298	58
Figura 38 Baterías del Robot Móvil.....	58
Figura 39 Esquema de energización del sistema.....	59
Figura 40 Esquema de bloques de la placa electrónica.....	60
Figura 41 Diseño de la PCB.....	61
Figura 42 a) Case bateria 3A b) Case bateria LIPO	62
Figura 43 Base del robot final.....	62
Figura 44 Validación del Modelo en V Sobre Elementos Eléctricos.....	63
Figura 45 Fuerzas en una rueda omnidireccional	64
Figura 46 Cinemática del robot omnidireccional.....	65
Figura 47 Direcciones según sentido de giro de las ruedas	67
Figura 48 Estructura de adquisición de datos	69
Figura 49 Arquitectura Arduino/software	69
Figura 50 Esquema del controlador PID	70
Figura 51 Circuito general de un motor DC.....	71
Figura 52 Diagrama de torques en el rotor.....	71
Figura 53 Gráfica del controlador movimiento hacia adelante	75
Figura 54 Gráfica del controlador movimiento hacia la izquierda	75
Figura 55 Gráfica del controlador movimiento diagonal	76
Figura 56 Gráfica del controlador movimiento diagonal negativo	76
Figura 57 Diagrama de flujo controlador On/Off	77
Figura 58 Plataforma del sistema de comunicación.....	78
Figura 59 Estructura de tópicos y nodos	79
Figura 60 Red local multimaster	79
Figura 61 Conexión de elementos mediante MQTT.....	80

Figura 62 Esquema de comunicación de la plataforma multirobot.....	81
Figura 63 Flujograma de inicialización.....	82
Figura 64 Flujograma de evaluación de red.....	83
Figura 65 Flujograma de colaboración	84
Figura 66 Flujograma de planificación de movimiento	85
Figura 67 Flujograma de procesos	86
Figura 68 Logo de Robot Operating System.....	88
Figura 69 Logo de Linorobot	89
Figura 70 Logo de PlatformIO IDE	89
Figura 71 Logo Node-RED.....	90
Figura 72 Esquema de integración de subsistemas por su tipo.....	90
Figura 73 Esquema de integración de subsistemas por su utilidad.....	91
Figura 74 Comparación diseño y producto final.....	94
Figura 75 Esquema de software utilizado	96
Figura 76 Trayectoria recomendada para pruebas	97
Figura 77 Direcciones para pruebas de movimiento.....	98
Figura 78 Prueba en línea vertical.....	98
Figura 79 Distancia de desfase con la trayectoria.....	99
Figura 80 Recorrido horizontal del robot.....	100
Figura 81 Medición del error en trayectoria horizontal	101
Figura 82 Resultado obtenido en Rviz, trayectoria horizontal.....	101
Figura 83 Recorrido horizontal del robot.....	102
Figura 84 Trayectoria con forma cuadrada del robot móvil	103
Figura 85 Puntos críticos del recorrido cuadrado	104
Figura 86 Resultado obtenido en Rviz, figura cuadrada	104
Figura 87 Robot Simba	106
Figura 88 Giro en su propio eje del robot diferencial	106
Figura 89 Cambio entre movimiento vertical y horizontal	106
Figura 90 Comparación robot diferencial/omnidireccional	107
Figura 91 Red de comunicación.....	108
Figura 92 Espacio de pruebas para trabajo colaborativo	109
Figura 93 Inicio de la prueba	109

Figura 94 Robots en los puntos indicados.....	110
Figura 95 Segunda prueba de robótica colaborativa	110
Figura 96 Resultado de la segunda prueba.....	111

CÁPITULO I

GENERALIDADES

El primer capítulo nos presenta la necesidad de implementar una red descentralizada dentro de una plataforma de robótica colaborativa en la Universidad. Se hace una breve revisión de proyectos similares tanto en la academia como en la industria. Además, se definen el objetivo general, los objetivos específicos, el alcance del proyecto y la descripción de la estructura del documento.

1.1. Antecedentes

Gracias a las investigaciones e implementaciones comerciales, los robots móviles individuales se han vuelto muy sofisticados. Una alternativa de investigación es utilizar varios robots más simples para lograr tareas complejas por medio del funcionamiento cooperativo (Arkin, 1990). Como se puede ver en la Figura 1 se están realizando trabajos con enjambres de robots.

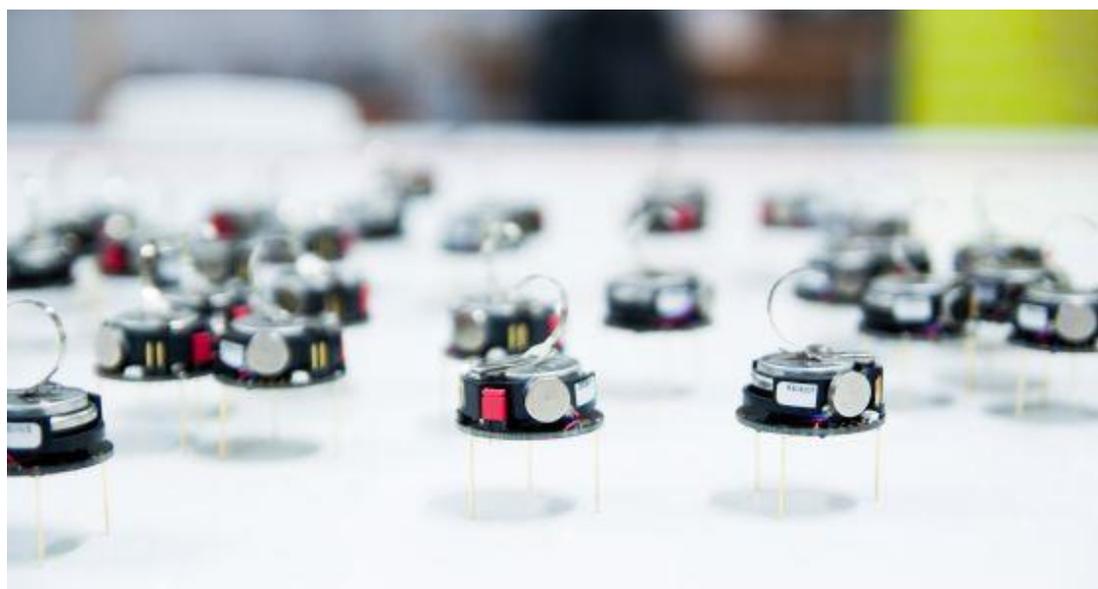


Figura 1 Enjambre de robots, Robots kilobots

Fuente: (Altares, 2014)

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se ha desarrollado prototipos sobre robótica colaborativa (Campoverde, 2017) los cuales marcan una base para la elaboración del proyecto. Generalmente al realizar una red colaborativa se plantea una red centralizada, sin embargo para comprender el concepto de red se debe definir un sistema multirobot.

Los sistemas multirobot (MRS) son, en la actualidad, un área de investigación importante dentro de la robótica y la inteligencia artificial. Desde dominios de aplicación y tareas que se enfrentan los MRS son de creciente complejidad, la capacidad de cooperación de los robots puede considerarse como una característica fundamental. Existen prototipos de robots con características particulares de estructura redonda para funciones específicas como se muestra en la Figura 2.



Figura 2 Sistema multirobot

Fuente: (Universidad Politecnica de Madrid, 2010)

Uno de los principales ejemplos de MRS es el futbol robótico, el cual consiste en conectar una red de robots que tienen como objetivo anotar un gol empujando una esfera hacia una portería, estas acciones comprenden el diseño e implementación de un conjunto de algoritmos y técnicas de control e inteligencia artificial. El sistema de red planteado es centralizado como se puede observar en la Figura 3 del trabajo de (Villarreal S., 2009)

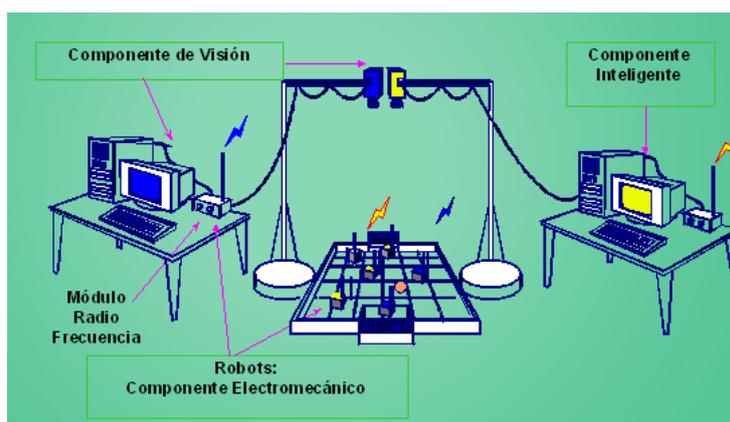


Figura 3 Ilustración de los componentes de fútbol robótico

Fuente: (Turmero, 2015)

Esta descripción gráfica muestra como un ordenador principal reúne toda la información, decide que hacer y envía órdenes a los robots que están en la red. Un sistema centralizado consiste en transferir información desde un único punto central. Las investigaciones relacionadas a la coordinación de robots comenzaron con la aparición del paradigma del control basado en comportamientos (Brooks R. , 1986).

Se pueden distinguir cuatro filosofías distintas a la hora de abordar el problema de coordinación de robots:

- Seguir al líder: el robot principal realiza la planificación de trayectoria, ubicación y movimientos sirven para que los demás robots lo repliquen, es decir sigan al líder. (Vaz, Monteiro, & Bicho, 2004).
- Control basado en comportamientos: inspirado en el comportamiento de los grupos de animales, se combinan comportamientos (Fredslund & Mataric, 2001).
- Técnicas de estructura virtual: la formación entera es considerada como una sola entidad y los robots intentan alcanzar la estructura virtual (Belta & Kumar, 2002).
- Teorías de control: enfocado en la dinámica y estabilidad de la formación de sistemas multi-robots (Yamaguchi, Aria, & Beni, 2001).

Por supuesto que estos cuatro métodos de control no son excluyentes, sino que es posible combinarlos entre sí cuando se diseña un sistema de control de formación para robots móviles (Toibero, Roberti , Carrelì , & Fiorini, 2008).

Además, la estrategia de control puede clasificarse en:

- Centralizada, cuando existe un monitoreo y control de todos los robots para que se ubiquen en las posiciones deseadas (Kelly, 2004).
- Descentralizada, cuando no existe un supervisor y sólo se realimentan las posiciones relativas detectadas por cada robot respecto de sus vecinos (Stipanovica , Inalhana, Teo , & Tomlina, 2004).

El tipo de control que se emplean en los diversos sistemas multirobots es una característica importante en las investigaciones anteriores sobre el tema. Las tácticas de control pueden ser clasificadas como centralizadas (Kelly, 2004) cuando existe un monitoreo y control de todos los robots por un procesador central; o descentralizada (Balch & Arkin, 1998) cuando no existe supervisión, cada robot tiene su propio controlador y las realimentaciones de control son solo las posiciones relativas de cada robot con respecto a sus similares.

Para finalizar la ejemplificación basada en antecedentes se citan trabajos realizados, organizados geográficamente desde lo más general hasta lo más cercano a la Universidad.

A nivel mundial se desarrollan sistemas colaborativos autónomos, donde se propone tipos de control de la formación de robots móviles que eviten los obstáculos de forma distribuida en entornos desordenados como en (K., Li, Wang, & Shao, 2016). Hoy en día la mayoría están basados en robótica aérea, es decir con drones. Los robots tienen la capacidad de tomar decisiones sobre acciones específicas, su área de trabajo consiste en un espacio tridimensional donde se destaca el número de agentes que incluyen dichos sistemas, incrementando así su área de cobertura (Kelin & Pratihari, 2016).

A nivel regional los proyectos realizados destacan en los países como Colombia, Chile entre otros los cuales han enfocado su investigación de trabajo colaborativo en asignación de tareas y planificación de trayectorias. Se realizaron análisis de impacto de la robótica colaborativa que ya se ha implementado en el mercado, donde existen nuevos retos de investigación como el tracking y la ubicación en interiores (Dias, Zlot, Kaira, & Stentz, 2006)

A nivel nacional se registran proyectos usando el trabajo colaborativo para la aplicación en fútbol robot, usando visión artificial y redes de sensores, no profundizando en la investigación sobre trabajo colaborativo, evidenciado en los resultados de (Pérez Checa, 2016). Además se tiene la implementación de una red de robots utilizando IoT como plataforma de comunicación (González & Verdugo , 2018). Estas aplicaciones y proyectos son en un número reducido lo que nos presenta un entorno a nivel nacional con poca investigación sobre trabajo colaborativo.

1.2. Importancia y Justificación

Las plataformas de robótica colaborativa son un aspecto importante en la investigación hoy en día, la implementación de dichos equipos de trabajo basado en robots cooperativos están ganando espacio en la industria por lo que revisar las alternativas y mejoras que se pueden aportar a estos sistemas son necesarios en la academia. En la Universidad de las Fuerzas Armadas han existido pocos trabajos anteriores, y con el proyecto que se plantea se espera tener una plataforma de robótica colaborativa que gracias a su flexibilidad y escalabilidad ayude a repotenciar el estudio en este campo.

Como se pudo observar, en los antecedentes de este trabajo, se han realizado varias investigaciones en sistemas multirobots. Las principales características de los sistemas son:

- Número de robots
- Estrategia de control
- Coordinación de robots

Luego de la investigación realizada, se tienen las siguientes conclusiones sobre estos tres aspectos, sobre el número de agentes robóticos se tiene un número mínimo de 3 dispositivos los cuales son suficientes para realizar un trabajo colaborativo. Sobre la estrategia de control, es usada la centralización por su facilidad en implementación, sin embargo, existen distintas alternativas que se pueden aplicar. Una de las principales recomendaciones de trabajos futuros son la utilización de la descentralización en sistemas multirobots (de la Cruz, Carelli, & Cristiano, 2007).

En la coordinación de robots se han utilizado varias estrategias combinadas, una de ellas es “seguir al líder”. El presente proyecto al ser una red descentralizada tendrá un control basado en teorías de control, utilizando sensores en los actuadores y la retroalimentación de sensores extras que sean necesarios para realizar el seguimiento a cada uno de los robots.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema multirobot descentralizado para realizar trabajo colaborativo con aplicaciones en logísticas flexibles y escalables.

1.3.2. Objetivos Específicos

Se presentan a continuación los objetivos específicos que ayudarán al logro total del objetivo principal.

- Diseñar robots móviles de estructura modular y de costos accesibles.
- Crear un sistema multirobot escalable y modular, que permita implementar fácilmente distintos dispositivos para trabajos futuros.
- Crear un sistema multirobot flexible, que permita la utilización de distintos sistemas de control para el cumplimiento de tareas asignadas.

- Descentralizar el control del sistema multirobot para la participación autónoma de cada robot dentro de la red.
- Utilizar software y tecnología de licencia abierta.

1.4. Alcance

Se plantea el diseño y construcción de un sistema multirobot MRS de 3 unidades que tengan capacidad de comunicación entre ellos, gracias a un entorno en software libre basado en un sistema de posicionamiento con una red de sensores eficiente. Los robots que estén dentro del sistema enviarán y recibirán señales que les permita conocer su ubicación, con lo cual se realizará la retroalimentación para cada robot en posición y movimiento dentro de un área predeterminada. Los requerimientos básicos de cada ente robótico se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1
Alcance del proyecto

N°	Requerimientos
1	Cantidad suficiente de robots para crear una red de robótica colaborativa
2	Brindar buena maniobrabilidad
3	Cada robot debe tener un peso máximo de 2Kg
4	Autonomía energética mayor a una hora
5	Capacidad de carga mayor a 1 kilogramo
6	Comunicación inalámbrica entre componentes del sistema
7	Sistema operativo de licencia abierta.
8	Costo de cada robot menor a 700 dólares
9	El robot móvil debe tener autonomía para tomar decisiones
10	La plataforma robótica debe ser flexible.
11	La plataforma robótica debe tener características escalables

Se espera que al terminar este proyecto de titulación se entregue la plataforma funcional de robótica colaborativa a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, específicamente al laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos para que sea una base para futuras investigaciones sobre el tema.

1.5. Estructura del documento

El documento del trabajo se estructura en cinco capítulos donde se muestra y describe toda la información y desarrollo del trabajo a realizar en la plataforma robótica móvil para interiores.

En el capítulo 1 se presentan las generalidades y precedentes que se tiene para del proyecto a realizar, se definen los objetivos al igual que el alcance del mismo.

En el capítulo 2 se tiene la revisión del estado del arte en el campo de la robótica móvil y la implementación de sistemas multirobots. Se presenta además la conceptualización de los sistemas involucrados en la autonomía y posicionamiento.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo mecatrónico del sistema. Se detallarán el desarrollo de conceptos, selección y pruebas de los mismos para decidir si existirán cambios de lo planteado en el alcance del proyecto.

En el capítulo 4 se detallan los resultados obtenidos después de la construcción e implementación de lo desarrollado en el capítulo número 3. De igual manera se especifican las pruebas realizadas en la plataforma, así como, el análisis de resultados de la misma.

Finalmente, en el capítulo 5, se pueden encontrar las conclusiones, recomendaciones y propuestas para trabajos futuros.

CÁPITULO II

ESTADO DEL ARTE

El capítulo presenta la conceptualización sobre robótica colaborativa, especificando los sistemas multirobots, así como en los subsistemas necesarios para que se presente una colaboración entre los entes de la plataforma robótica. Es decir, el sistema de localización, navegación y comunicación. También, incluye los detalles sobre robótica móvil, al ser la base en la que se plantea la plataforma colaborativa en el proyecto.

Se analiza el significado de autonomía en plataformas robóticas tomando en cuenta las diferentes investigaciones que se están realizando en la actualidad. De igual forma se toma en cuenta cuales son las características que el presente trabajo debe tener para poder ser aplicado en sistemas flexibles y ser un proyecto escalable.

2.1. Robótica Móvil

En la Tabla 2 Se realiza una reseña histórica de la evolución de la robótica, nombrando hitos importantes hasta la aparición de los primeros robots móviles.

Tabla 2

Linea de Tiempo de la robótica móvil

Época	Nombre	Descripción
1968	Shakey	Primer robot móvil desarrollado en Standford Resarch Institute. (Ortigoza, Marcelino Aranda, Ortigoza, & Hernandez, 2012)
1990	Robots para medios industriales	John Engelberger realiza los primeros robots en movimiento para utilizarlos en aplicaciones industriales (Córdoba López, 2016)
1994	Dante I y Dante II	Realizados en la Universidad de Carnegie Mellon, robots móviles usados para investigación de volcanes. (Ruiz, 2006)
1997	Mars Pathfinder	La NASA envía un robot móvil controlado desde la tierra para estudiar la superficie de Marte. (Campoverde, 2017)
1999	AIBO	Sony lanza el perro mascota robótico (Quinlan, Chalup, & Moddleton, 2003)
2000	ASIMO	Es el primer humanoide comercial presentado por Honda (Sakagami, y otros, 2002)

Fuente: (Ruiz, 2006)

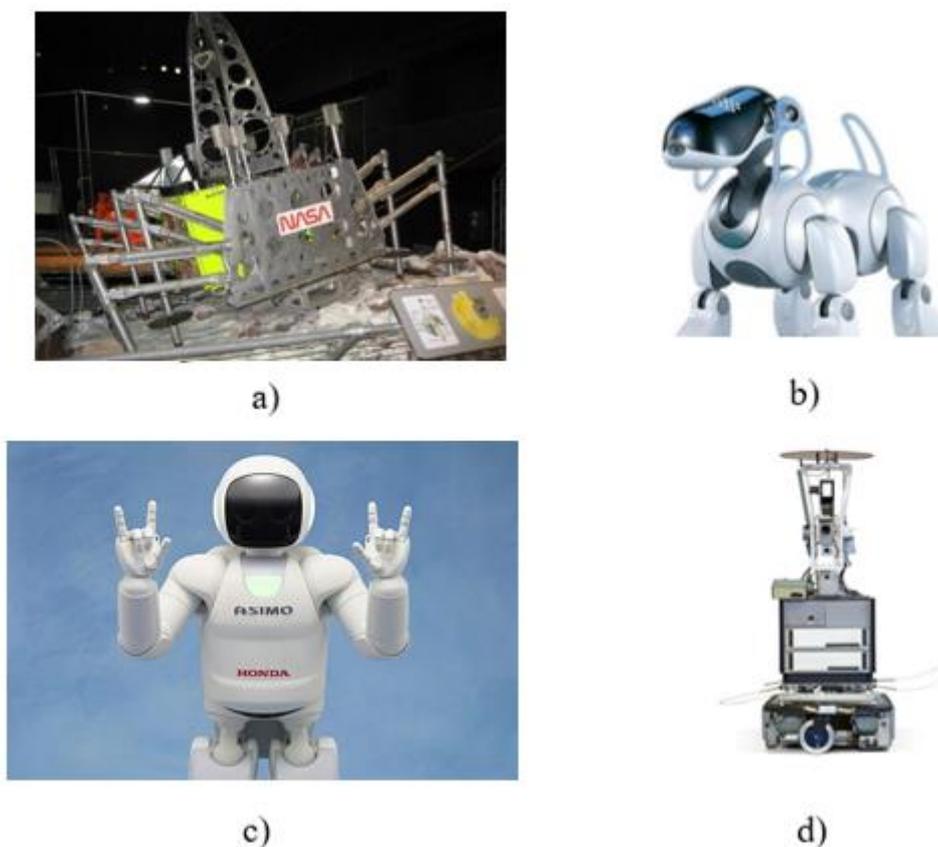


Figura 4 Robots móviles a) Dante I b) AIBO c) Asimo d) Shakey

En la Figura 4 se tienen ilustraciones de algunos ejemplos de robots, que han marcado un hito en la historia, dando paso a una nueva forma de hacer robótica. Como dato más relevante tenemos al literal d, Shakey siendo este el primer robot móvil desarrollado en 1968. Desde ese tiempo hacia la actualidad la robótica móvil ha dado pasos gigantes en su desarrollo.

La robótica móvil es una de las ramas más importantes dentro de la clasificación de la robótica, y además el presente proyecto de titulación se basa en entes robóticos móviles los que se definen como: “Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento (re) programado por medio de control automático para realizar una tarea específica” (Lazea, 2001).

Tabla 3
Tipos de robot móviles por su medio de locomoción

Tipo	Sistema	Definición
Terrestres	Deslizante	Simulan el movimiento de serpientes o gusanos
	Rodantes	Su desplazamiento es mediante ruedas
	Caminantes	Tienen patas que permiten su movimiento, pueden ser bípedos, cuadrúpedos, hexápodos etc.
	Rulantes	El desplazamiento es por orugas o cadenas
Aéreos	Ala rotativa	Su impulso es gracias a la rotación de xaspas, el ejemplo más popular son los drones
	Ala fija	Su vuelo es gracias al aire debajo de sus alas
Acuáticos	Flotante	Se impulsa mediante turbinas, simulando un barco
	Submarino	Tienen aletas o similares, se basan en la estructura de animales acuáticos como peces

Fuente: (González & Verdugo , 2018)

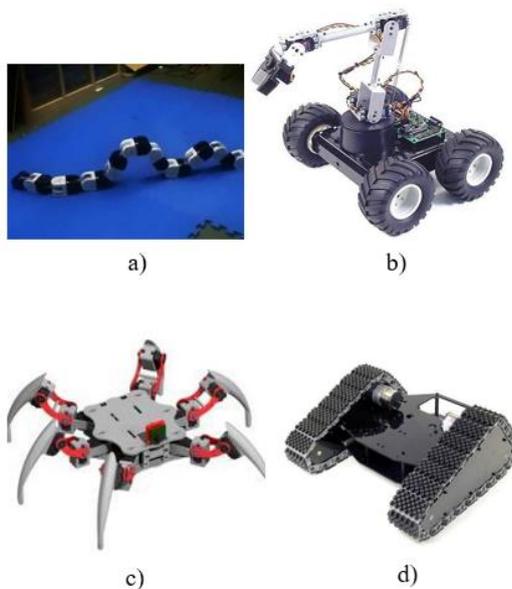


Figura 5 Robots terrestres a) Deslizante b) Rodante c) Caminantes d) Rulante

En la

Tabla 3 Se clasifican los diferentes tipos de robots móviles según su medio de locomoción, siendo esta su característica principal. Como se puede observar existen varios elementos que permiten el traslado de un punto a otro. Los robots terrestres que se muestran en la Figura 5 tienen mayores aplicaciones que los demás aunque últimamente los robots aéreos están ganando espacio en investigación gracias al avance de la tecnología.

La autonomía es una característica del robot móvil, se refiere a la capacidad de que un ente robótico realice acciones sin la necesidad de la intervención del ser humano, dentro de ello se tiene como una función importante a la navegación del robot. Se tiene como ejemplo la tortuga de Walter, presentada en 1948, que podía evitar obstáculos hasta dirigirse a una estación de carga si así lo requería. Desde los dispositivos electromecánicos hasta la actualidad se ha avanzado mucho en niveles de autonomía. (Ollero , 2001)

Los robots móviles se han convertido en una herramienta muy importante y necesaria en varias aplicaciones tanto industriales como no industriales. El principal aspecto a tomar en cuenta es el entorno en donde se va a desenvolver, para darle ciertas características. Por ejemplo no es lo mismo deslizarse en una plantación que en una planta industrial. Las aplicaciones más populares se llevan a cabo en agricultura, en el campo nuclear, seguridad y defensa, inspección y mantenimiento.



Figura 6 Robot móvil KUKA omniMove

Fuente: (KUKA, 2017)

En la Figura 6 se puede observar al robot KUKA omniMove el cual es una plataforma de transporte de fácil manejo y muy flexible para adaptarse diferentes ambientes industriales. (KUKA, 2017)

2.2. Elemento de locomoción

Como se mencionó los robots móviles se clasifican también por el tipo de locomoción utilizado, en general, los tres medios de movimiento más comunes son: por ruedas, por patas y orugas. Cabe señalar que aunque la locomoción por patas y orugas han sido ampliamente estudiadas, el mayor desarrollo se presenta en los Robots Móviles con Ruedas. (Silva, y otros, 2007)

Para robots móviles se han desarrollado varias alternativas, pero la solución más utilizada y simple es la implementación de ruedas. Se pueden encontrar un sin número de implementaciones en trabajos de titulación o proyectos de investigación alrededor del mundo sobre robótica móvil con ruedas. Esta opción tiene un buen rendimiento en terrenos duros y libres de obstáculos, sin embargo también tienen algunas limitaciones (Ollero , 2001).

2.3. Navegación

La navegación es la metodología por la cual un robot móvil puede desplazarse por distintos entornos, de acuerdo a este concepto se definen campos los cuales permiten que se aplique esta metodología. La navegación tiene cuatro fundamentos principales; odometría, localización, percepción del entorno y el control de movimiento. Para tener éxito en esta competencia el robot debe cumplir estos cuatro fundamentos. (Quinaluisa & Toapanta , 2018).

2.4. Estimación de Posición

El lugar de ubicación en un entorno definido es muy importante para la planificación y el movimiento de cada robot. La localización de un robot móvil es un pilar fundamental de la navegación. En el plano XY se necesitan 2 coordenadas, y además se puede considerar el ángulo de giro del robot con el eje principal, de otra manera se puede considerar a cada ente robótico como un punto (Vallés Miquel & Valera Fernández, 2014).

La localización autónoma de un robot móvil se plantea como un problema de estimación de los parámetros (X, Y, θ) . La coordenada θ es el ángulo de giro, o también conocido como la orientación. Para lograr tener estos parámetros de ubicación se necesita una serie de sensores, y al ser una recolección de datos a base de varios instrumentos existen altas posibilidades de tener ruido. (Gonzales Jiménez & Ollero Baturone, 1996).

Por lo tanto, el problema de la estimación de posición se puede considerar como problema de obtención de datos estadísticos. Entre los criterios más utilizados destacan el de mínimos cuadrados y el de máxima verosimilitud. (Matthies & Shafer, 1987)

$$J = \|y - \hat{y}\|^2 = (y - \hat{y})^T (y - \hat{y}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La ecuación responde al criterio de mínimos cuadrados y sirve para la estimación de un vector L donde $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ es un conjunto de N medidas, e $\hat{y} = (\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n)^T$ valores calculados a partir adoptado para la estimación de la posición. (Gonzales Jiménez & Ollero Baturone, 1996)

Esta solución puede ser una herramienta si se utilizase una serie de datos desde sensores internos que proporcionen una ubicación del robot móvil.

2.4.1. Estimación Basada en Medidas Internas

El método más utilizado para estimar la posición y orientación de un robot móvil se fundamenta en sintetizar la trayectoria recorrida basándose en un conjunto de medidas internas: giros realizados por ruedas, rapidez, aceleración, giros con respecto al eje perpendicular.

a) Odometría

Es una forma de obtener la posición de un dispositivo que se impulsa mediante actuadores rotativos (Ortiz, 2014). Gracias a la medición de una velocidad angular que generalmente se obtiene gracias a un tren de pulsos obtenido por una rueda dentada y un lector óptico, también se lo conoce como encoder.

La gran ventaja de la odometría se debe a su simplicidad y bajo costo. Sin embargo, existen problemas como necesidad de calibración como consecuencia del desgaste y pérdida de presión de las ruedas, desajuste de los ejes, entre otras (Wang, 1988), por lo que este método depende bastante de las irregularidades del suelo y el deslizamiento de las ruedas.

b) Sistema de Navegación Inercial

Los Sistemas de Navegación Inercial (INS) estiman la posición y orientación del vehículo empleando medidas de las aceleraciones y ángulos de orientación (Gonzales

Jiménez & Ollero Baturone, 1996). Gracias a la aceleración se puede obtener velocidad y posición por medio de la integración con respecto al tiempo.

Uno de los inconvenientes de estos dispositivos es su precisión, generalmente al tener velocidades bajas como en los robots móviles la relación entre señal/ruido también es pequeña y por lo tanto se necesitan algoritmos para reducir ese ruido y mejorar la precisión del acelerómetro. Métodos probabilísticos de corrección de localización

Dentro de los diversos métodos que existen para la corregir la incertidumbre de ubicación de un robot móvil se consideran las siguientes opciones como posibles soluciones. (Quinaluisa & Toapanta , 2018)

- Filtro de Kalman
- Filtro Extendido de Kalman
- Filtro de Partículas

2.5. Sistemas Multirobots

Los sistemas multirobots son grupos de robots que tienen funciones similares o un objetivo similar, estos sistemas son la base de la robótica colaborativa que mediante la interconexión entre distintos robots permiten lograr diferentes objetivos entre ellos, como por ejemplo mapeo de áreas, operaciones logísticas, entre otras, permitiendo cubrir mayores áreas y optimizando procesos y actividades.

La robótica colectiva es un área de investigación muy activa en la comunidad robótica. Los sistemas multi-robot o los equipos de robots han surgido de forma efectiva como una alternativa al paradigma del diseño y control de sistemas robóticos debido a la capacidad para explotar la redundancia en la detección y la actuación. (Ana Cristina Palacios, 2011)

En términos generales, un Sistema Multi-Robot puede ser caracterizado como un conjunto de robots que operan en el mismo entorno. Sin embargo, los sistemas robóticos pueden ir desde simples sensores, adquiriendo y procesando datos, a máquinas complejas similares a las humanas, capaces de interactuar con el medio ambiente de maneras bastante complejas. (Alessandro Farinelli, 2004)

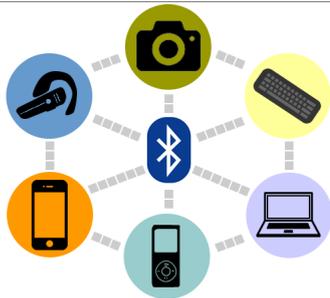
2.6. Red de Comunicación

La comunicación en plataformas de robótica móvil exige una comunicación inalámbrica, porque la comunicación a base de cableado le haría perder la característica de robótica móvil. En la

Tabla 4 se muestran las alternativas utilizadas para este tipo de red.

Tabla 4
Sistemas de Red

Red	Característica	Ilustración
WiFi	En base a un router Wireless que mediante antenas envía y recibe datos de otros dispositivos a través de señales de radio. Este router puede decodificar y enviar información al internet usando	

	un cable de conexión. (Lozano, 2017)	
Bluetooth	Es una tecnología de corto alcance de reducido consumo de energía, consta de un control digital y un dispositivo de radio. (Lozano, 2017)	
Zigbee	Basado en IEEE 802.15.4 de redes de área personal, especialmente utilizado a domótica. Su objetivo principal es simplificar una red de sensores. (Castillo Merchán, 2016)	
RFID	Tecnología que surgió con el propósito de identificación de objetos. Consta de lectores, antenas y etiquetas. (Nava Diaz, Chavarria Juarez, Hervás Lucas, & Bravo Rodriguez, 2009).	

Fuente: (González & Verdugo, 2018)

La adquisición de información y el envío de datos es una característica que ocupa gasto energético y capacidad de procesamiento. Existen tres tipos principales de distribución de red, centralizado donde un solo agente se encarga del control de la información. En el sistema descentralizado, hay procesadores coordinados, donde cada uno tiene un objetivo en su espacio de trabajo. El sistema distribuido el procesamiento es mayor ya que cada uno tiene una zona más pequeña de control. (Pallás, 1993)

En la Figura 7 se explica gráficamente los tres tipos de red, y a continuación se define cada uno.

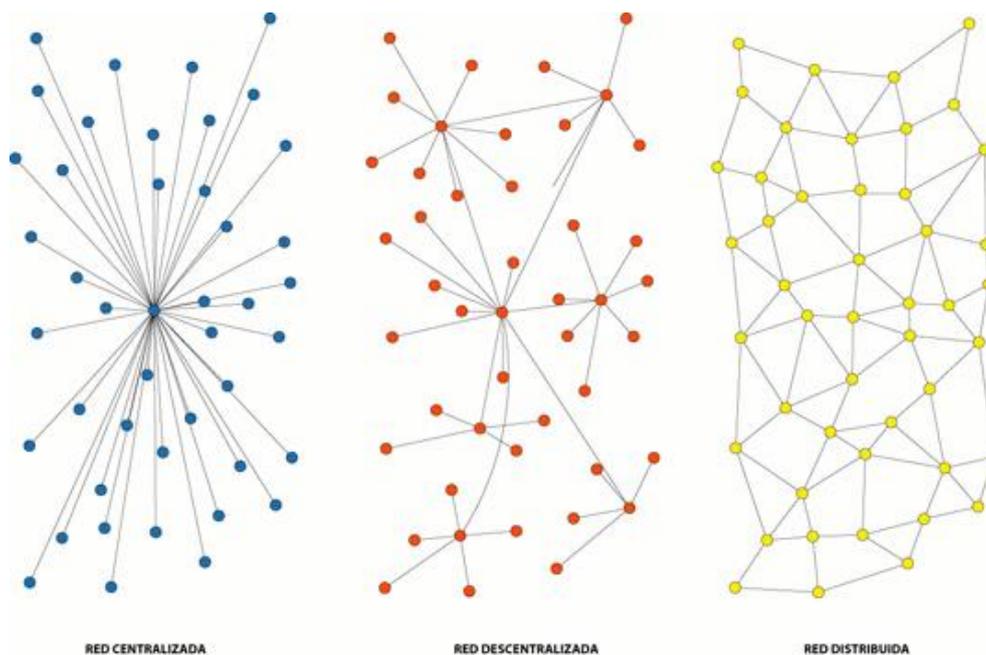


Figura 7 Esquemas de las diferentes topologías de red

Fuente: (Lozano, 2017)

En la parte izquierda de la Figura 7 se tiene una red centralizada. Existe un nodo central y todos los demás son nodos periféricos, toda la información debe salir y llegar al nodo central. Un fallo en el nodo central haría que la red falle completamente, sin embargo la información de todos los periféricos se encuentra fácilmente. (Borrell, Garcia , & Roberto, 2005).

En la parte central de la Figura 7 se tiene la ilustración de una red descentralizada donde existe una interconexión de varios nodos centrales, cada uno tiene un conjunto de periféricos a su control, la caída de un nodo de estos no llevaría a una falla completa de la red si no solo de una parte. (Stallings, 2004).

Finalmente en la parte derecha se encuentra una red distribuida, en si en algunos textos se refieren a un tipo de red descentralizada, en donde no existe un nodo central ni tampoco un nodo que al caerse separe la red. Todos los nodos se conectan entre sí. (Borrell, Garcia , & Roberto, 2005).

2.7. Robótica Colaborativa



Figura 8 Gráfica de crecimiento de robots colaborativos

Fuente: (Tabuenca Alcuson , 2017)

En un estudio realizado por el MIT en una fábrica de BMW ubicada en Carolina del Sur - Estados Unidos, se demostró que los equipos conformados por humanos y robots colaborativos tienen un desempeño más eficiente. Se espera un crecimiento en la industria tal como se puede evidenciar en la Figura 8. Donde la línea verde representa la incidencia de este campo en la investigación contra la línea azul que es la participación en la industria ya como un producto comercial. (Tabuenca Alcuson , 2017)

En los últimos años la creación de redes colaborativas han sido implementadas para solucionar problemas de desplazamiento de carga y eficiencia energética. El comportamiento colectivo se define como el procedimiento de un robot en un sistema en el cual existe más de uno. En cambio el comportamiento colaborativo es una subclase de comportamiento colectivo que está caracterizado por la asociación de partes en busca del beneficio mutuo. (Jiménez, Vallejo , & Ochoa , 2007)

El cumplimiento de un objetivo con la interacción entre dos o más robots se puede llamar robótica colaborativa. El propósito principal de la colaboración entre robots es prescindir de una funcionalidad específica para cada uno, se busca eliminar redundancias en el

funcionamiento, optimizar los recursos y tener un nivel de automatización más alto. (González & Verdugo , 2018)

Por estos conceptos se puede afirmar que un sistema multi-agente robótico mostrará comportamiento cooperativo sí hay un incremento en el desempeño del sistema, siendo esta mejora en el desempeño el principal objetivo de la interconexión de robots. El mecanismo de cooperación puede estar basado en la imposición por parte del diseñador de una estructura de control o comunicación. (Jiménez, Vallejo , & Ochoa , 2007)

CÁPITULO III

METODOLOGÍA Y DISEÑO

El capítulo muestra la metodología con la que se realizará el diseño de la plataforma de robótica colaborativa y la estructura de cada uno de los robots. Se utilizará la metodología de diseño para sistemas mecatrónicos VDI 2206, que se basa en el diseño concurrente. De acuerdo con el método empleado se obtendrá los parámetros más adecuados para llegar al objetivo planteado en el proyecto de titulación.

3.1. Introducción

Para asegurar el correcto desarrollo de sistemas mecatrónicos, se propone el modelo con el procedimiento más flexible, que es apoyado esencialmente en tres elementos: (VDI-2206)

- Ciclo general de resolución de problemas
- Modelo V
- Módulos de proceso predefinidos para el manejo de pasos de trabajo recurrentes en el desarrollo de sistemas mecatrónicos

El objetivo del diseño concurrente es analizar al unísono varios requerimientos o puntos de vista que el trabajo final debe presentar. La base de la metodología de diseño planteada es el modelo en “V” de la Figura 9 que se planteará para los diferentes requerimientos tanto generales como específicos. El diseño en “V” tiene como entrada los requerimientos del proyecto, estos requerimientos se solventan teniendo en cuenta los diferentes aspectos que influyen en un proyecto.

La base de los sistemas mecatrónicos son sus subsistemas mecánico, eléctrico, de control y TIC. Se pueden añadir más subsistemas dependiendo las necesidades y características de cada proyecto. El objetivo del modelo en “V” es diseñar cada uno de estos subsistemas pensando en la integración final de todos, logrando así tener productos terminados de una manera más eficiente. El modelo en “V” es un análisis cíclico entre las decisiones y aplicaciones en cada subsistema con su desempeño e integración en el proyecto principal.

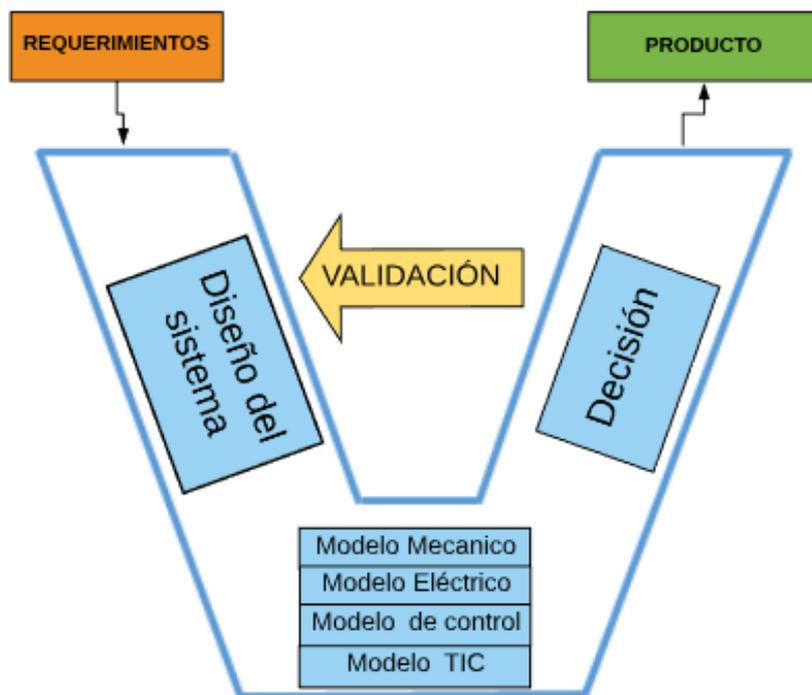


Figura 9 Modelo en V para metodología concurrente

Fuente: (VDI-2206)

El diseño del sistema busca solucionar o dar alternativas a todos los subsistemas y los requerimientos que se propusieron en los numerales anteriores. Se analiza y se plantea soluciones, también se comparará si cada una de las opciones cumple con otros requerimientos o no interfiere en el cumplimiento de los mismos. Los pasos a seguir se presentan a continuación.

- *Diseño del sistema:* Se hace una introducción y se presenta una serie de alternativas.
- *Análisis y decisión:* Se consideran y se resuelve cuál de todas las alternativas es la más adecuada para el sistema.
- *Verificación y resultados:* Se justifica la elección o el conjunto de elecciones y se comprueba que no interfiera con algún otro requerimiento.

3.2. Requerimientos del proyecto

Primero se definieron los requerimientos principales en la Tabla 5 que se encuentra en la sección Alcance en el Capítulo 1, basándose en estos requerimientos, se obtendrán las especificaciones técnicas para plantear alternativas de solución en el proyecto. Se divide el proyecto en subsistemas o subtemas que se van a analizar de la forma que nos muestra la norma VDI 2206 que fue la metodología escogida para el proyecto.

Tabla 5
Especificaciones del proyecto

N°	Requerimientos
1	Cantidad suficiente de robots para crear una red de robótica colaborativa
2	Brindar buena maniobrabilidad
3	Cada robot debe tener un peso máximo de 2Kg
4	Autonomía energética mayor a una hora
5	Capacidad de carga mayor a 1 kilogramo
6	Comunicación inalámbrica entre componentes del sistema
7	Sistema operativo de licencia abierta.
8	Costo de cada robot menor a 700 dólares
9	El robot móvil debe tener autonomía para tomar decisiones
10	La plataforma robótica debe ser flexible.
11	La plataforma robótica debe tener características escalables

3.2.1. División de Subsistemas

Se divide el proyecto en sistemas más pequeños para facilitar su análisis, cada uno de estos son módulos que al final deben integrarse entre sí, por lo que se toma muy en cuenta la necesidad de hacer un diseño redundante entre todos los subsistemas. Es decir que al final exista

una concatenación de todos ellos para cumplir el objetivo principal del proyecto de titulación. A continuación, se muestra dicha división que se va a realizar en la plataforma multirobot.

- Subsistema Mecánico
- Subsistema Eléctrico
- Subsistema de Control
- Subsistema de TICs

3.3. Subsistema Mecánico

El subsistema mecánico engloba todo lo relacionado a la estructura del robot como forma, elementos y distribución de dichos elementos. Se justificarán los diseños desde un programa de diseño por computadora (CAD) y según la necesidad de cada uno de los elementos se construirán e implementarán comprobando que el diseño es el correcto.

3.3.1. Arquitectura del Robot

- **Diseño del sistema:**

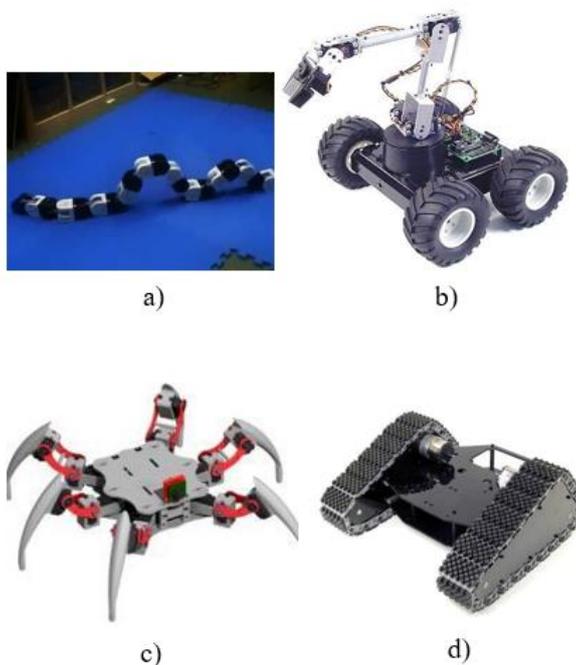
Como se ha visto en el trabajo de investigación previo, la robótica móvil se encuentra muy avanzada y se han presentado varias arquitecturas en sus implementaciones. Se conoce que la robótica móvil se divide en 3 grandes grupos según su entorno, terrestres, acuáticos y aéreos. Como se ha definido en este trabajo se diseñarán robots terrestres por lo cual se debe puntualizar características principales de este tipo de robots.

Los robots terrestres a su vez se dividen en deslizantes, rodantes, caminantes y rulantes. En la Tabla 6 se muestran sus definiciones y características. De igual manera se determinó que se van a realizar robots móviles rodantes (RMR).

Tabla 6*Tipos de robots terrestres*

Robots Terrestres	
Sistema	Forma de movimiento
Deslizante	Simulan el movimiento de serpientes o gusanos
Rodantes	Su desplazamiento es mediante ruedas
Caminantes	Tienen patas que permiten su movimiento, pueden ser bípedos, cuadrúpedos, hexápodos etc.
Rulantes	El desplazamiento es por orugas o cadenas

Fuente: (Gonzales Jiménez & Ollero Baturone, 1996)

**Figura 10** a) Dezlisante b) Rodantes c) Caminantes d) Rulantes

En la Figura 10 se pueden observar las ilustraciones de los tipos de robots, en el literal “a” se tienen una serpiente robótica que es un robot deslizante, en el literal “b” un robot móvil impulsado por ruedas, un hexápodo en el literal “c” y finalmente en el literal “d” un robot que se mueve por cadenas, como los tanques de guerra. Los últimos tres se han aplicado en investigaciones y existen en diferentes industrias.

- **Análisis y decisión:**

La arquitectura de un robot con ruedas no tiene muchas variaciones, en general hay tres figuras que se han utilizado como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Arquitecturas de Robots con Ruedas

Arquitecturas de Robots con Ruedas		
Triangular	Circular	Polinomial
		

Arquitectura triangular:

La forma triangular es una estructura simple de tres lados, las ventajas que presenta es su tamaño más reducido, en comparación con las diferentes formas. También se reduce la necesidad de elementos, como por ejemplo la cantidad de ruedas. Entre las desventajas se consideran el área reducida para los diferentes elementos electrónicos como batería, procesadores, entre otros. Otra de las limitaciones que se tiene en este tipo de robots son las restricciones dinámicas y la poca investigación que se ha realizado para esta arquitectura de robots.

Arquitectura circular:

La forma circular ha sido implementada en varias investigaciones y productos comerciales. Principalmente por su mayor facilidad en esquivar y rodear obstáculos. Existe disponibilidad de espacio bastante grande en una circunferencia y una de las ventajas que también brinda la

forma redonda de un elemento es que su dirección no está definida por su forma, como en el triángulo en donde una de sus puntas es el frente por estándares o generalidades ya dadas por investigaciones anteriores.

Arquitectura rectangular:

La arquitectura rectangular es la más utilizada para robótica móvil, principalmente debido al uso de esta forma para los vehículos cotidianos de transporte. Su principal ventaja es el amplio conocimiento que se tiene de esta forma de robot como sus restricciones dinámicas, su configuración cinética entre otras, gracias a estos antecedentes se puede afirmar que la desventaja más importante son sus restricciones de movimiento en especial por sus aristas vivas.

Al analizar las características obtenidas de las tres formas tentativas para un robot móvil, se tiene como la mejor opción a la arquitectura circular. Esto ayuda a la maniobrabilidad y al esquivar objetos, se busca también tener mayor espacio donde ubicar sus elementos y tener una forma que ayude a la futura escalabilidad del mismo ya que este tipo de arquitectura aprovecha mucho mejor el área destinada para la colocación de sus elementos.

3.3.2. Ruedas del Robot Móvil

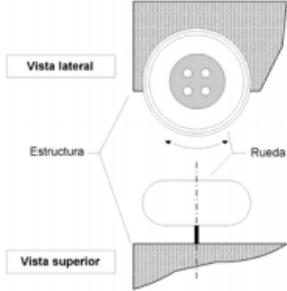
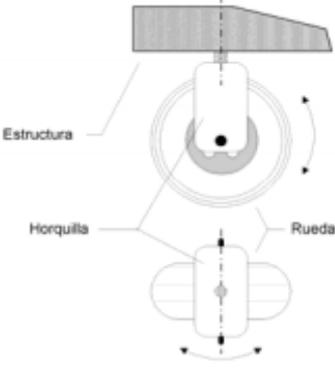
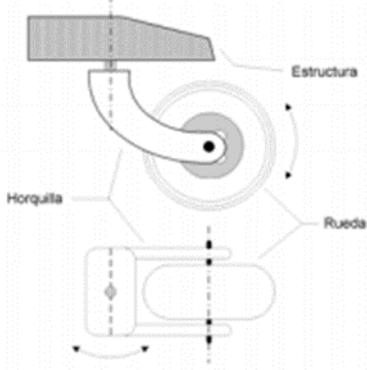
- **Tipo de Ruedas**

- **Diseño del sistema:**

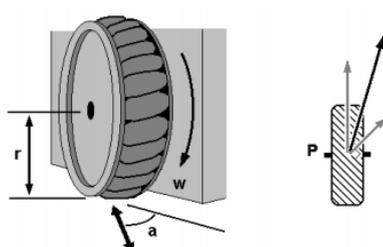
Finalmente se debe decidir sobre el tipo de llantas a utilizar, de igual manera se aplica un modelo en V sustentado por una matriz de evaluación para elecciones más específicas como las que se presentan en esta sección. Se muestran diferentes alternativas con su definición respectiva en la

Tabla 8. Posterior en la Tabla 9 se tiene una matriz de evaluación donde se realiza una valoración con respecto a cada característica importante del proyecto.

Tabla 8
Tipos de Ruedas

Nombre	Características	Ilustración
<p>A Rueda Fija</p>	<p>Su eje es fijo a la estructura, su función principal dentro de la robótica es la tracción, tiene un grado de libertad</p>	
<p>B Rueda orientable centrada</p>	<p>Consiste en una rueda que tiene un eje de rotación perpendicular a su eje de giro, dándole así dos grados de libertad</p>	
<p>C Rueda orientable no centrada</p>	<p>A diferencia de la anterior esta rueda tiene un eje de rotación desplazado, también conocida como rueda loca</p>	

CONTINÚA 

Rueda D Omnidireccion al	Es una rueda convencional	
	con una serie de rodillos que están asociados con la región. Estos tienen un eje de rotación a 45 ° respecto al plano de la rueda.	

Fuente: (González & Verdugo , 2018)

- **Análisis y decisión:**

Una matriz de evaluación es una herramienta para valorar cada característica con un peso porcentual dependiendo de su importancia. La columna “Peso” muestra el porcentaje de importancia, los literales corresponden a las opciones mostradas en la sección de Diseño del Sistema. Las ponderaciones se muestran en la columna de calificación (Ca) y multiplicado por el peso se obtiene la Evaluación Ponderada (Ep) finalmente la opción que tenga la mayor sumatoria de estos valores debe ser la opción a desarrollar (Ulrich & Eppinger, 2013).

Tabla 9

Matriz de evaluación sobre el tipo de rueda

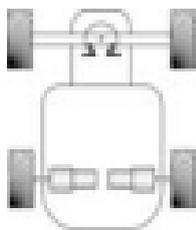
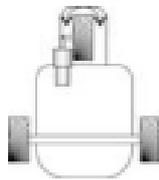
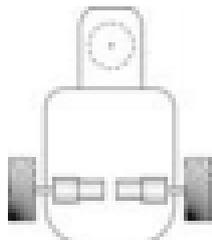
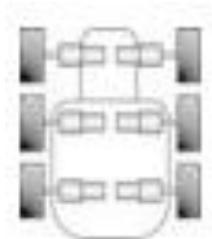
Criterios de Selección	Peso	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Innovación	40%	1	0.4	2	0.8	3	1.2	5	2
Maniobrabilidad	40%	2	0.8	2	0.8	3	1.2	5	2
Costo	10%	4	0.4	3	0.3	3	0.3	2	0.2
Repuestos	10%	5	0.5	4	0.4	4	0.4	2	0.2
Total de Puntos		2.1		2.3		3.1		4.4	

- **Configuración de las Ruedas**

- **Diseño del sistema:**

No solo es importante saber el tipo de ruedas si no la configuración, se han estudiado varias estructuras de vehículos con ruedas que se muestran en la Tabla 10. El tipo de rueda no influye en su configuración, es decir que pueden existir varias combinaciones.

Tabla 10
Configuración de las Ruedas

	Tipo	Característica	Ilustración
A	Ackerman	La configuración más conocida, se aplica a los vehículos de transporte, generalmente la tracción se da en las ruedas traseras y en el medio de las ruedas delanteras se tiene el control de dirección. Pueden existir variaciones.	
B	Triciclo clásico	La rueda delantera funciona tanto para tracción como para orientación	
C	Diferencial	La velocidad de las ruedas laterales gobiernan el desplazamiento, tienen una rueda "loca" que ayuda con cambios de orientación	
D	Skid Steer	Esta configuración generalmente se encuentra en vehículos que necesita fuerza de tracción ya que la tiene en todas sus ruedas, no tiene cambio de orientación directa, se lo logra por diferencia de velocidades.	

CONTINÚA



E	Síncrona	Tiene transmisiones que permiten orientar tres ruedas con velocidad angular de esta manera se permite el desplazamiento lineal del vehículo	
---	----------	---	--

Fuente: (Ollero, 2001)

- **Análisis y decisión:**

Teniendo todas las posibilidades definidas se analiza las alternativas teniendo en cuenta que la forma del robot es circular. Hay que aclarar que cualquier configuración se puede implementar en la arquitectura ya definida. La característica primordial que se está buscando es la maniobrabilidad, el tipo de ruedas a utilizar deben ayudar a mejorar esta característica junto con su configuración. Si se utilizara solo ruedas convencionales, la configuración más adecuada sería la Ackerman. Se tendría que realizar un sistema de cambio de orientación en el eje de las ruedas delanteras y el sistema de tracción como se puede ver en la Figura 11.



Figura 11 Configuración Ackerman

Fuente: (Spyrus, 2016)

Otra opción para utilizar solo las ruedas convencionales es utilizar la configuración “Skid Steer”, como se ve en la Figura 12. Esta combinación daría como resultado robots con alta tracción pero la característica de la maniobrabilidad se vería reducida.



Figura 12 Robot de alta tracción

Fuente: (Ortiz, 2014)

Por maniobrabilidad se analiza la opción de combinar tipo de ruedas, la utilización de dos ruedas convencionales para la tracción y una rueda loca para brindar maniobrabilidad y estabilidad Figura 13. Las ruedas convencionales deben tener actuadores propios para que los giros se den gracias a la diferencia de velocidades entre ellas.

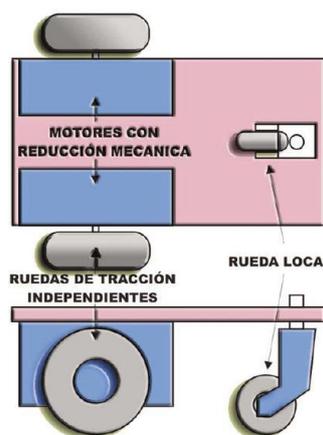


Figura 13 Robot diferencial

Fuente: (Goyeneche, 2010)

Se analiza la última opción que presenta el mayor grado de maniobrabilidad, aunque no ha sido muy implementado en trabajos de investigación las ruedas omnidireccionales son una alternativa relativamente nueva que brinda gran maniobrabilidad, el robot puede desplazarse en el plano XY en ángulos de 90° y 45° . Todas las variaciones pueden girar con respecto al plano perpendicular en caso de requerirlo. Como se observa en la Figura 14 literal “a” se pueden

configurar desde tres ruedas hasta añadir una fila de ellas como se observa en el literal “b” de la misma ilustración.

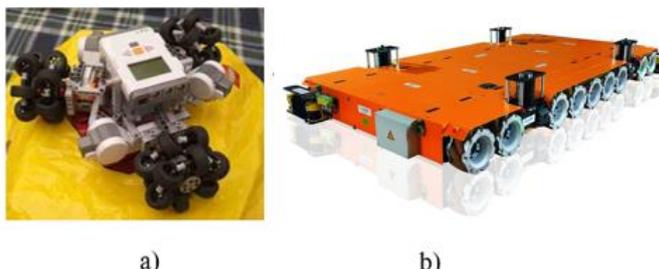


Figura 14 Robots omnidireccionales a) 3 ruedas b) 4 ruedas o más

Fuente: (Mindstroms , 2016) (KUKA, 2017)

Debido a que la maniobrabilidad es la característica principal que se busca sustentar con las decisiones de forma, configuración y tipos de ruedas se decidió realizar el diseño e implementación de robots móviles con las características que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Tabla de decisiones

Característica	Decisión	Ventajas	Desventajas
Forma	Circular		
Configuración de las ruedas	Skip Steer	Maniobrabilidad y robustez	Costos y poca investigación
Tipo de ruedas	Omnidireccionales		

Para realiza el diseño con las medidas respectivas se necesita las especificaciones de los elementos del robot, por lo tanto se procede escoger el tipo de ruedas omnidireccionales y los elementos eléctricos.

- **Ruedas Omnidireccionales**

- **Diseño del sistema:**

Las ruedas omnidireccionales no son un invento nuevo, sin embargo su implementación ha sido muy escasa por lo que no son tan conocidas. A pesar de esto existen muchas empresas que

fabrican este tipo de ruedas para prototipado, en la Tabla 12 se definen opciones para la implementación en el proyecto con diferentes características.

Tabla 12
Tipos de Ruedas Omnidireccionales

	Nombre/Marca	Descripción	Ilustración
A	UniHobby UH184	Ruedas de plástico de 38 mm de 1,5 mm tiene 8 rodillos de PU. Esta rueda incluye acoplamientos de montaje de aluminio de 4 mm, capacidad de carga de 2 kg	
B	UniHobby UH144	Ruedas de aluminio de 60 mm tiene 8 rodillos de PP+PE. También conocida como rueda Sueca, capacidad de carga de 12 kg	 CONTINÚA →
C	Pitsco Education 36466 Tetrax MAX	Ruedas de plástico de 50 mm de diámetro, delgada de dos hileras de rodillos 10 en cada fila. Capacidad de carga 1kg.	
D	Omnwheel Mecano	Rueda de aluminio de diámetro externo de 54mm, anchura la rueda 34mm 60 gramos de peso cada rueda. Capacidad máxima de carga hasta 3.5 kg	CONTINÚA → 

El tipo de ruedas que se presentan son opciones comunes en ruedas omnidireccionales, se presentan en varios modelos principalmente en material plástico y otros pocos en aluminio. Para escoger las ruedas se debe tener en cuenta varios factores externos como la facilidad de adquisición, calidad y disponibilidad de repuestos. Se presenta una matriz de selección en la Tabla 13.

- **Análisis y decisión:**

Tabla 13

Matriz de evaluación sobre ruedas omnidireccionales

Criterios de Selección	Peso	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Calidad	30%	3	0.9	5	1.5	1	0.3	4	1.2
Capacidad de carga	30%	3	0.9	5	1.5	2	0.6	4	1.2
Investigación previa	20%	2	0.4	5	1	CONTINÚA →			
Costo	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Repuestos	10%	2	0.2	2	0.2	4	0.4	2	0.2
Total de Puntos		2.7		4.5		2		3.3	

Los resultados obtenidos dan paso a la elección de las llantas omnidireccionales de aluminio de la marca UniHobby con la serie UH144 que se presenta en la Figura 15.

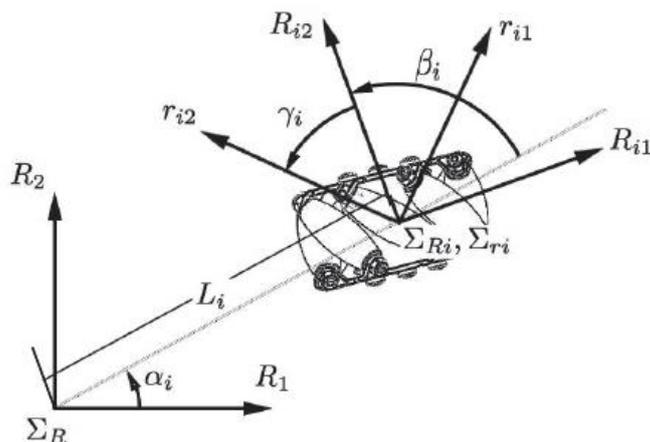


Figura 15 Parámetros cinemáticos de una rueda Sueca

Fuente: (Sáenz , Bugarin, & Santibáñez, 2015)

Con la implementación de este tipo de ruedas reducen las restricciones dinámicas de los robots con ruedas tradicionales como se puede evidenciar en la Figura 16, donde un robot con ruedas omnidireccionales necesita menos y más simples movimientos para estacionar el robot móvil o esquivar objetos.

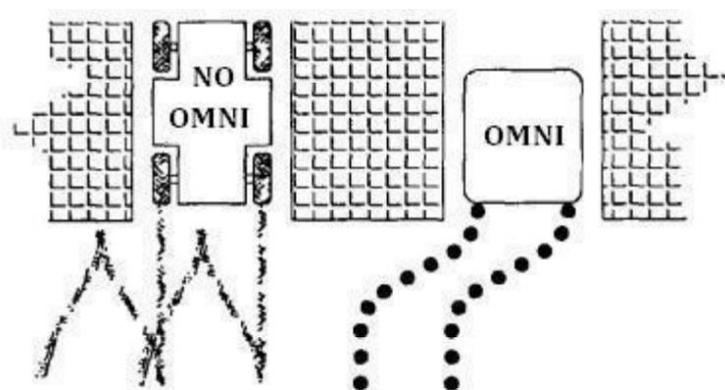


Figura 16 Comparación de restricciones dinámicas

Fuente: (Ollero , 2001)

3.3.3. Actuadores

- **Diseño del sistema:**

Existen dos tipos de motores eléctricos según su corriente, alterna y continua, al ser esta una aplicación para robot móvil se va a utilizar motores de corriente continua. Los requerimientos mínimos que deben tener los motores se presentan en la Tabla 14. Para los actuadores se tienen tres diferentes tipos definidos en la Tabla 15, los motores eléctricos de corriente continua tienen

un sin número de opciones comerciales de cada tipo, tamaño, forma, voltaje de entrada, velocidad, por lo que se deben definir características para buscarlos en el mercado.

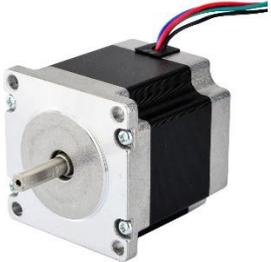
Tabla 14

Requerimientos de los motores

Propiedad	Característica
Tamaño	Pequeño
Torque	Mayor a 0.75N/m
Sensor de velocidad	Incluido
Rango de voltaje	5-12 Voltios
Velocidad de respuesta	Rápida

Tabla 15

Opciones de actuadores DC

Nombre	Características	Ilustración
A Servo Motor	Consta de un motor DC, una tarjeta de control y un tren de engranes, la variable que se puede controlar es su velocidad.	
B Motor a Pasos	Funciona mediante un tren de pulsos y su característica principal es la precisión de cantidad de giro.	

CONTINÚA



C	Motor DC	Convierte energía eléctrica en mecánica, tiene un torque bajo que se soluciona con mayor velocidad. Su ventaja es la rápida respuesta que tiene.	
---	----------	--	--

- **Análisis y decisión:**

Se realiza una matriz de valoración binaria, donde “+” es una valoración positiva mostrando que cumple con la característica requerida y “-” indica la carencia de la misma, al final se suma y resta una unidad respectivamente y con el resultado mayor se tendrá la mejor opción a desarrollar, como se puede observar en Tabla 16 .

Tabla 16

Matriz de valoración para motores

Criterios de Selección	A	B	C
Torque requerido	+	+	+
Sensor incluido	+	-	+
Velocidad de respuesta	-	-	+
Vcc entre 5-12V	+	+	+
RESULTADO	3	CONTINÚA →	

Como se puede observar debido a las características mostradas, la mejor opción de implementación son los motores DC, hay que solventar algunas desventajas que los motores DC dan al proyecto como lo son el bajo torque y la medición de su velocidad. El cálculo de la velocidad de giro se lo realiza con un encoder, y el problema del bajo torque se lo puede solventar con una reducción gracias a un tren de engranes.

Con estas características definidas para el actuador se busca en el mercado, dando como resultado el motor presentando en la Figura 17. El cual cumple todos los parámetros dados.

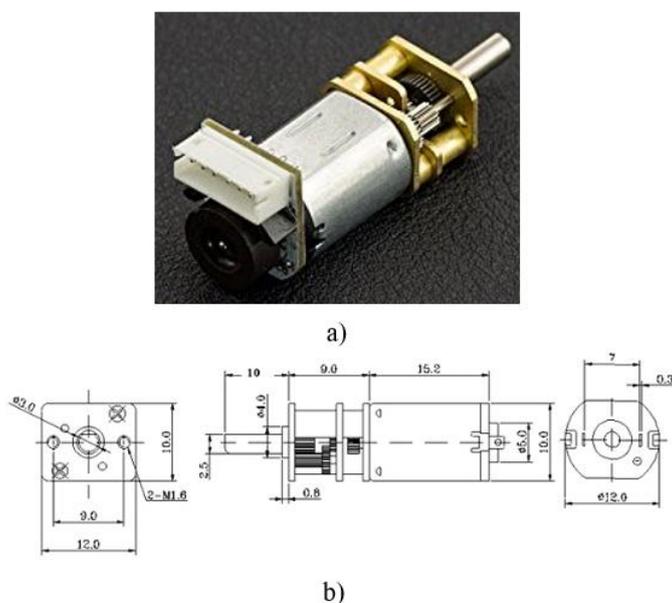


Figura 17 a) Micro motor b) Planos micro motor
Fuente: (CQRobot, 2017)

El motor DC obtenido es un micro motor que tiene las características mostradas en la Tabla 17. Y cumple con todos los parámetros planteados para el proyecto.

Tabla 17
Parámetros de actuador según catálogo
Parámetros motor DC

Voltaje/V	6	12
Velocidad/RPM	71	142
Reducción	1:100	
Corriente sin carga	0.04 A	
Corriente de perdida	0.55 A	
Potencia	0.35 A	

Diámetro del eje	3mm
Largo del eje	10mm
Peso	15g

Fuente: (CQRobot, 2017)

Posterior a su adquisición se comprobaron los datos dados por el catálogo, teniendo como resultados valores similares. Así que se valida la implementación de este tipo de actuadores para los robots móviles.

- **Verificación y resultados**

Con los datos de forma, tipo de ruedas y actuadores ya definidos se comienza con la fase de diseño, se utiliza un software CAD (SolidWorks). Primero se procedió a realizar los diseños de las ruedas y los motores que se obtuvieron comercialmente. En la Figura 18 se muestra el resultado de las ruedas omnidireccionales este modelo también se o conoce como ruedas “Suecas”, existen dos tipos una derecha y otra izquierda.

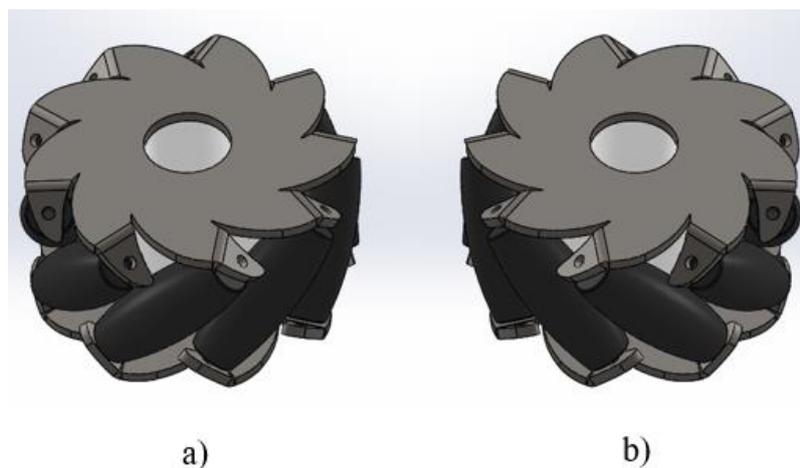


Figura 18 a) Rueda sueca izquierda b) Rueda sueca derecha

De igual manera se realizan los diseños de los motores DC adquiridos, en la Figura 19 se muestra los resultados obtenidos.

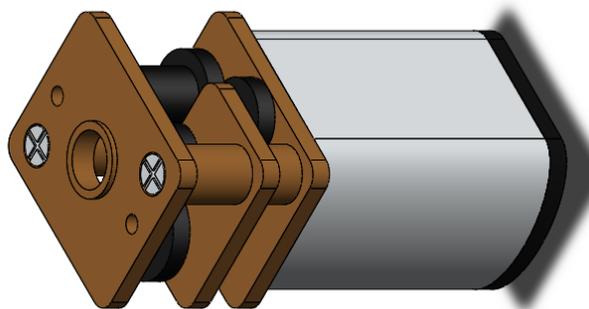


Figura 19 Diseño del micro motor

El motor debe ser acoplado a la rueda omnidireccional, para eso se tuvo que diseñar una pieza la cual asegure a la rueda con el eje del motor. En la Figura 20 se muestra el resultado obtenido para realizar esta unión.

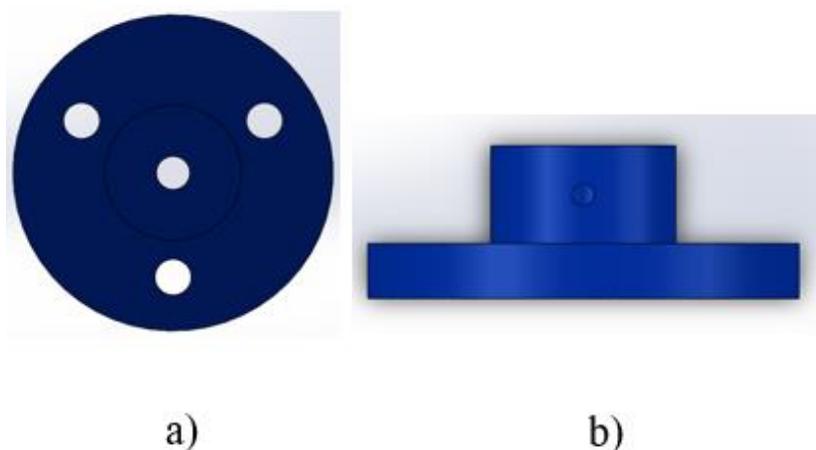


Figura 20 Acople motor/rueda a) Vista frontal b) Vista superior

Para terminar en el CAD se unen los 3 diseños realizados dando como resultados una integración aceptable como se puede ver en la Figura 21. Para realizar el ensamble los orificios del acople se unen a la rueda por tornillos y el acople al motor será asegurado con un prisionero.

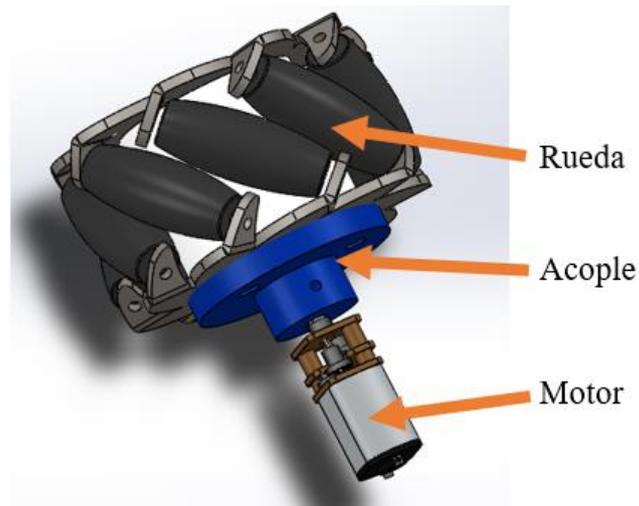


Figura 21 Ensamblaje motor/acople/rueda

Para asegurar los motores a la estructura de la base del robot se necesita diseñar un camisón para atornillar el ensamble del motor, acople y rueda a la base. En la Figura 22 se presenta el resultado final y la forma que van a ser unidos a la estructura.

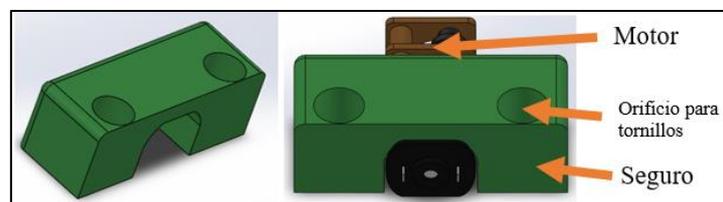


Figura 22 Diseño del seguro del motor a la base del robot

Para finalizar se diseña la base del motor con forma redonda, con los orificios necesarios para las ruedas y asegurar el motor en la Figura 23 se presenta la forma final del diseño.

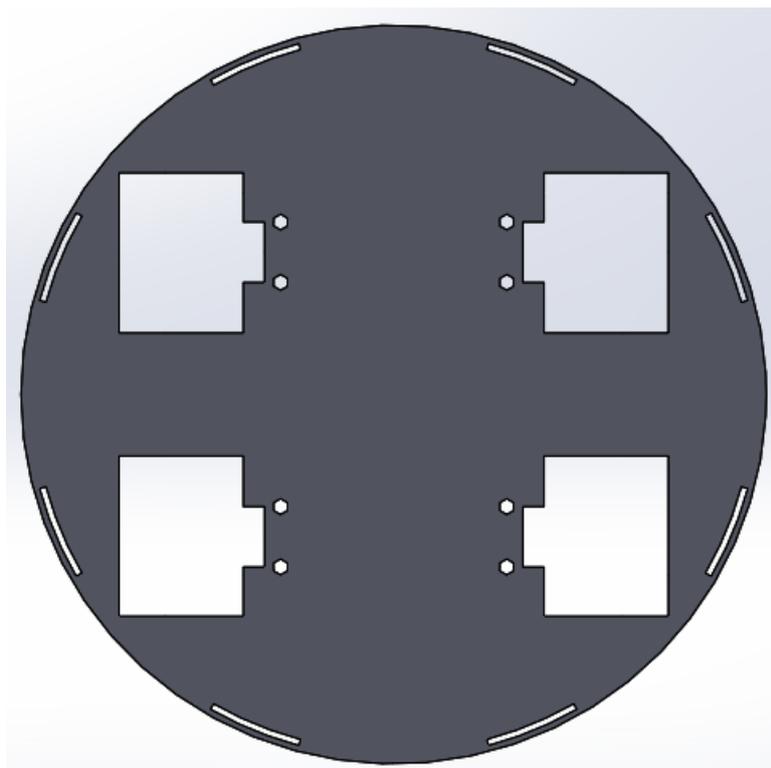


Figura 23 Diseño de la base del robot

En la Figura 24 se muestra un ensamblaje que comprueba que todo lo diseñado se acopla y coincide con los elementos adquiridos comercialmente. Esto es la base del robot móvil y es el resultado de todos los pasos seguidos en el diseño para cada elemento mecánico. Antes de manufacturar cualquiera de estas piezas diseñadas por computadora se debe terminar con la elección de los demás elementos que formarán parte del robot móvil, ya que podrían sufrir cambios o aditamento si otros elementos lo requieren.

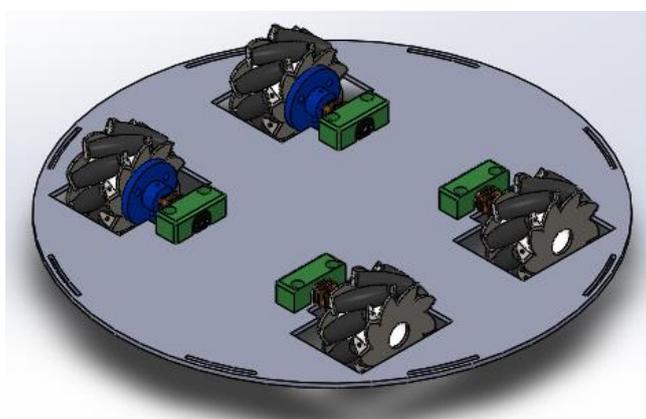


Figura 24 Ensamblaje de la base del robot móvil

Validacion con modelo en V:

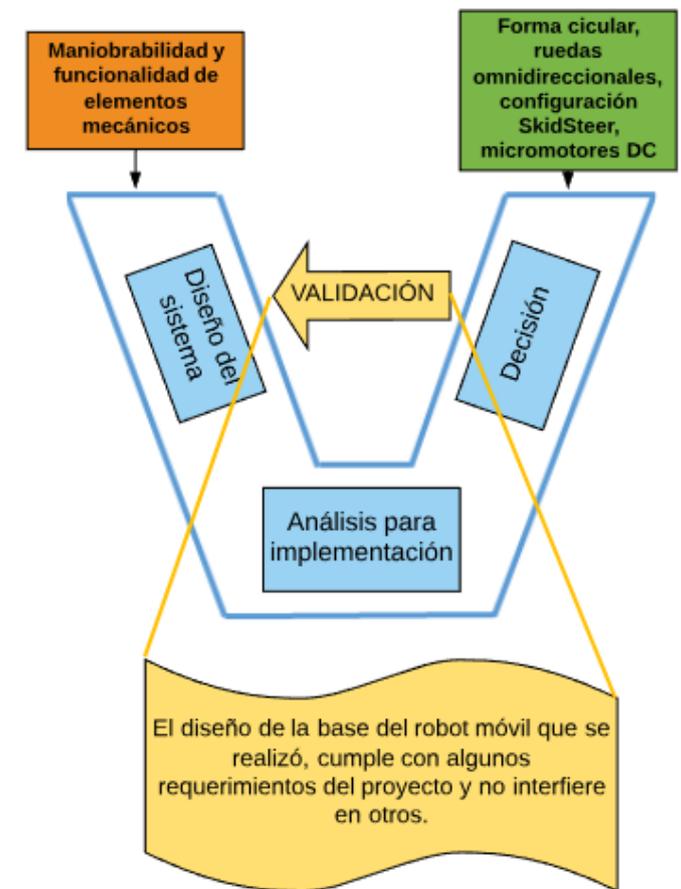


Figura 25 Modelo en V para validación del diseño

El diagrama en V de la Figura 25 representa el análisis realizado en la sección de Subsistema Mecánico y las piezas diseñadas para su posterior implementación. Los requerimientos que se ven favorecidos por las implementaciones realizadas son las siguientes

Forma Robusta: La forma redonda del robot y las ruedas omnidireccionales el robot móvil puede responder a cambios en su entorno de buena manera, la forma combinada con el movimiento hace que el robot adapte su orientación y movimiento.

Maniobrabilidad: Las ruedas omnidireccionales ayudan a dirigir al robot móvil en cualquier dirección y la forma es la más adecuada para evitar y rodear objetos.

Escalabilidad: La forma redonda ayuda a brindar la mayor superficie para colocar elementos electrónicos para el robot móvil.

El requerimiento que se podría ver afectado con las implementaciones es el siguiente:

Costo: La elección de las ruedas omnidireccionales incrementa el costo esperado para cada robot móvil. Las ruedas convencionales son 10 veces mas económicas y por lo tanto se debe tener en cuenta para la elección de futuros elementos.

3.4. Subsistema Electrónico

Se realiza el mismo proceso de selección para la instrumentación electrónica; se debe escoger sensores, tarjeta de adquisición, tarjeta de control y finalmente se tiene que realizar un análisis energético. Se tiene en cuenta que en la sección de elementos mecánicos se realizó la selección de un micro motor con sensor encoder para el cálculo de la velocidad. En los siguientes literales se realiza el proceso de selección de cada uno de los sensores que se necesita el proyecto.

3.4.1. Sensores

Un sensor es un dispositivo que transforma una variación de magnitud del medio (velocidad, presión, temperatura, etc...) a una señal eléctrica. Esta señal eléctrica es tratada y modificada para su correcta lectura, y gracias a estas lecturas se realizan controladores para optimizar comportamientos del robot móvil. En esta ocasión las variables medir para su posterior control son la velocidad y la orientación.

- Velocidad

- **Diseño del sistema:**

El sensor de velocidad está incluido en el motor eléctrico, es un encoder de efecto hall como se ve en la Figura 26. Que transforma la velocidad angular del motor a un tren de pulsos.

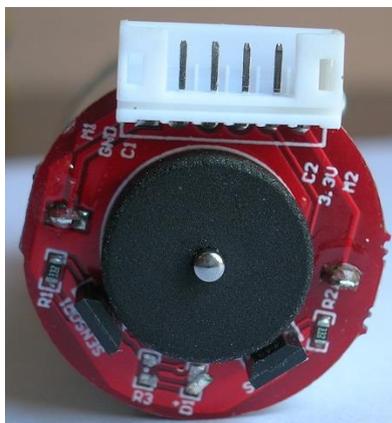


Figura 26 Encoder de efecto hall
Fuente: (Punto Flotante, 2006)

Este tipo de sensor se utiliza para el cálculo de velocidad, tiene dos sensores magnéticos desfasados 90° , con respecto al círculo completo del giro del motor. Posee imanes de ferrita que inducen la señal de los sensores como se muestra en la Figura 27 que entregan un tren de pulsos desfasado de la misma manera. El desfase de los dos imanes permite saber la dirección de giro del motor y con cálculos más sofisticados entre sensores se puede saber la trayectoria de un robot móvil a esto se lo conoce como odometría.

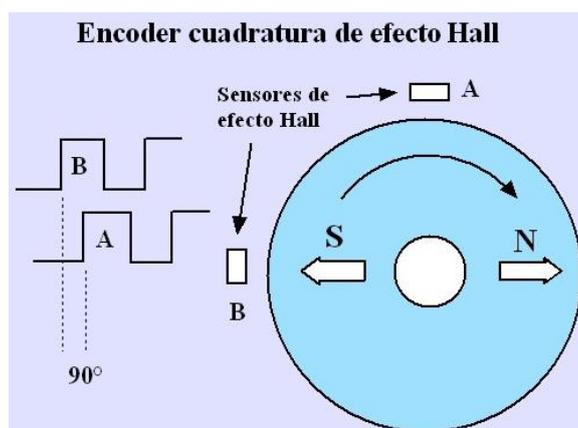


Figura 27 Señal de efecto hall
Fuente: (Punto Flotante, 2006)

- Orientación

La orientación de un robot móvil se define como el ángulo de giro en el plano XY como se muestra en la Figura 28 el ángulo φ sería el ángulo de orientación del robot, este valor es importante para saber la dirección en la que se va a dirigir el robot móvil si se moviese hacia adelante, para esta estimación se han aplicado sensores tanto externos como internos.

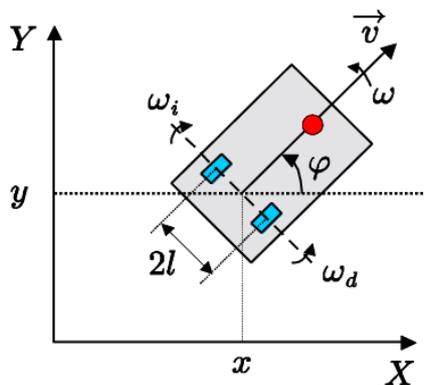


Figura 28 Orientación de un robot móvil

Fuente: (Ramos & Morales, 2010)

- IMU

Unidad de Medición Inercial, es un dispositivo electrónico que gracias a la combinación de acelerómetros y giroscopios puede medir velocidad, fuerzas gravitacionales y orientación de un sistema, siendo en este caso un robot móvil.

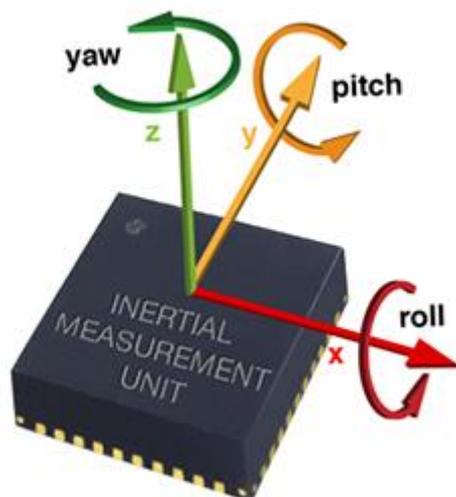


Figura 29 Ángulos de un sensor IMU
Fuente: (CQRobot, 2017)

En la Figura 29 se pueden observar las mediciones o valores de ángulos que entrega un sensor de este tipo, en el caso de un robot móvil y con las aplicaciones que se tienen en el proyecto el valor de interés es solo la rotación en el eje Z denominado “yaw”. Su ventaja es la disponibilidad de los datos en tiempo real ya que va integrado en el sistema, su desventaja es la cantidad de información que debe manejar para dar los resultados ya que se realizan cálculos matriciales.

- Cámara Cenital

La cámara cenital es un método muy utilizado en el robot soccer, este consiste en poner una cámara en la parte superior del sistema, el video que la cámara tiene es el universo por donde el robot móvil se puede mover. Gracias a principios de visión artificial o algoritmos de reconocimiento se puede verificar la orientación del robot móvil.

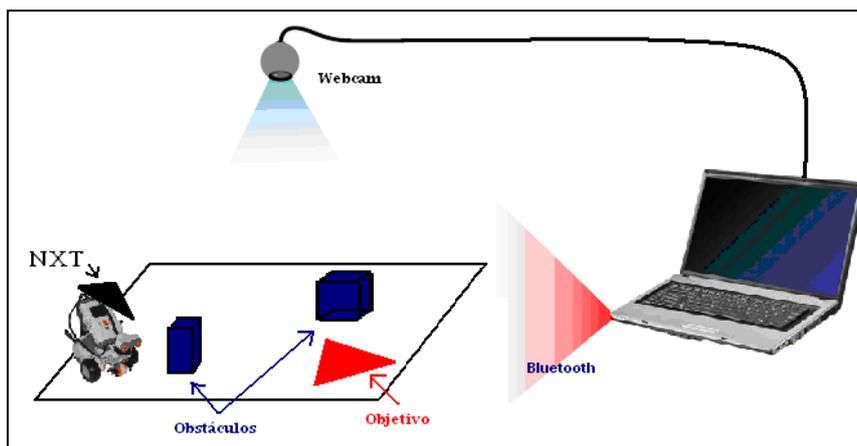


Figura 30 Esquema del control por cámara cenital
Fuente: (Soriano Viguera, 2017)

Una de las ventajas de este método es que se pueden conocer la ubicación exacta de obstáculos, y del robot móvil como se puede ver en la Figura 30. La desventaja principal es que el universo que esta cámara controla es limitado, y mientras más grande se quiere que sea este espacio de control mejor resolución y por ende mayor coste.

- **Sensor LIDAR**

El sensor LIDAR es un dispositivo que emite haces de luz infrarroja que rebota en objetos, gracias a que su estructura gira 360 grados en una velocidad constante ese haz de luz genera un mapa de los objetos que están alrededor del robot móvil como el ejemplo que se muestra en la . Su desventaja es el alto costo que este representa.



Figura 31 Mapeo con un sensor LIDAR

Fuente: (Quishpe, Salas, Gordillo, & Altamirano, 2013)

- **Análisis y decisión:**

Para la elección del método de reconocimiento de orientación se debe realizar una matriz de valoración con las características principales que el proyecto necesita. Las columnas mostradas en la Tabla 18 corresponden a los siguientes literales.

- A. Unidad de Magnitud Inercial (IMU)
- B. Cámara Cenital
- C. LIDAR

Tabla 18

Matriz de selección sensor de orientación

Criterios de Selección	Peso	A		B		C	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Flexible	35%	4	1.4	5	1.75	4	1.4
Escalable	35%	5	1.75	2	0.7	5	1.75
Antecedentes	15%	2	0.3	5	0.75	4	0.6
Costo	15%	5	0.6	2	0.3	1	0.15
Total de Puntos		4.05		3.5		3.9	

La mejor opción según el proceso de selección es el sensor IMU, su flexibilidad al ser utilizado como un elemento interno del robot y la escalabilidad que brinda al proyecto gracias

a que se puede obtener mucha más información del mismo sensor para proyectos futuros. Aunque el sensor LIDAR da mayores ventajas el alto precio hace que para este proyecto sea descartado.

3.4.2. Tarjetas Electrónicas

○ Tarjeta de Adquisición

Existen varias opciones en marcas de tarjetas de adquisición, además dentro de estas marcas existen algunos tipos que varían en sus características por lo que su elección debe basarse por los requerimientos, como la licencia abierta de su software, necesaria para este tipo de proyectos.

- **Diseño del sistema:**

Se analizarán dos opciones en marcas, National Instrument y Arduino. Estas dos empresas tienen opciones de tarjetas de adquisición para investigaciones sobre mecatrónica y diseño de prototipos tecnológicos. MyRio funciona con software de licencia comercial, su ventaja son los convenios con la Universidad de las Fuerzas Armadas y la disponibilidad de algunas de las tarjetas de adquisición que se muestra en la Figura 32.



Figura 32 MyRio DAQ
Fuente: (National Instrument, 2016)

Arduino es otra empresa que realiza tarjetas de adquisición, existen una variedad de tipos de tarjeta que varían en procesamiento y cantidad de entradas y salidas generalmente. En la Tabla 19 se ven las 4 opciones más comerciales en el país de esta marca con sus características, estas tarjetas de adquisición fueron diseñadas para realizar prototipos robóticos.

Tabla 19
Comparación de placas de arduino

Modelo	Micro controlador	Reloj	Vin	Vout	Digital I/O	PWM	Pines de interrupción
Arduino UNO	ATmega328	16 MHz	7-12V	5V	14	6	2,3
Arduino MEGA	ATmega2560	16 MHz	7-12V	5V	54	14	2, 3, 18, 19, 20, 21
Arduino Leonardo	ATmega32U4	16 MHz	7-12V	5V	20	7	0, 1, 2, 3, 7
Arduino DUE	AT91SAM3X8E	84 MHz	5-12V	3.3V	54	12	Todos sus pines

Fuente: (Arduino, 2015)

Las características principales que la tarjeta de adquisición debe brindar al proyecto es la posibilidad de escalabilidad y flexibilidad, esto se gana con posibilidad de aumentar periféricos al sistema como sensores y actuadores nuevos. También con la capacidad de procesamiento, a mayor procesamiento mayores prestaciones y velocidad dentro de la programación nativa.

El Arduino UNO tiene un tamaño reducido, tiene 14 pines de entrada y salida y brinda las ventajas de la programación desde un ordenador con el programa IDE de arduino que es de licencia abierta. El Arduino MEGA a diferencia del arduino UNO tiene muchos más pines de entrada y salida. Cada tarjeta tiene sus características extras y la más importante que se toma en cuenta de esta placa son la mayor cantidad de pines.

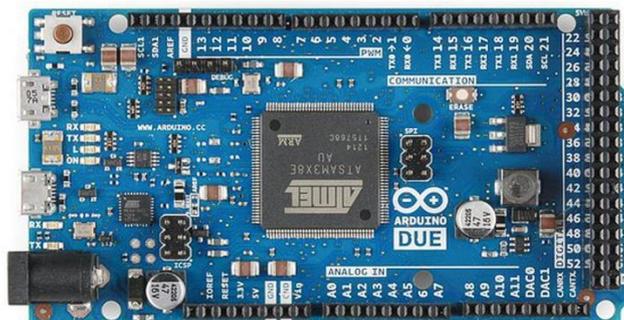


Figura 33 Arduino DUE

Fuente: (Arduino, 2015)

En la Figura 33 se observa un Arduino DUE, sus características físicas son idénticas al Arduino MEGA sin embargo tiene mayores prestaciones como se puede observar en la tabla comparativa mostrada anteriormente. Cada placa tiene sus características principales por lo que en el análisis se debe tomar en cuenta las necesidades del proyecto.

- **Análisis y decisión:**

Para la decisión se estable en la Tabla una matriz de selección con los parámetros principales que se buscan de la tarjeta de adquisición para el proyecto.

- A. Tarjeta MyRio de National Instrument
- B. Arduino UNO
- C. Arduino MEGA
- D. Arduino DUE

Tabla 20

Matriz de selección de tarjetas de adquisición

Criterios de Selección	Peso	A		B		C		D	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Pines de Interrupción	30%	4	1.2	2	0.6	4	1.2	5	1.5
Escalable	30%	5	1.5	2	0.6	4	1.2	5	1.5
Disponibilidad	20%	5	1	4	0.8	4	0.8	4	0.8
Licencia abierta	10%	1	0.1	5	0.5	5	0.5	5	0.5

CONTINÚA →

Costo	10%	4	0.4	4	0.4	3	0.3	2	0.2
Total de Puntos		4.2		2.9		4		4.5	

Aunque exista disponibilidad de tarjetas myRio estas necesitan software de licencia comercial, que en el futuro puede no estar disponible y esta característica interviene en uno de los requerimientos más importantes del proyecto.

La posibilidad de implementar una tarjeta Arduino MEGA da como ventaja mayor número de pines para conectar periféricos, se necesita un poco de espacio extra que se debe considerar en el diseño. Se tienen en cuenta que los sensores de velocidad tienen dos pines de lectura, el sensor IMU que ayudará en el cálculo de orientación necesita comunicación I2C, para las lecturas de estos sensores de preferencia se necesitan pines de interrupción naturales. Por lo tanto se tiene como necesidad un mínimo de 6 pines de interrupción y si se quisiera conectar todos los pines de lectura en especial de los sensores de velocidad se necesitarían 10 pines de interrupción.

Ya que físicamente el modelo MEGA y el DUE son idénticos la característica de sus pines de interrupción genera que la matriz de selección la tome como la mejor decisión. Las características del modelo se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21
Características Arduino DUE

Características Arduino DUE	
Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Voltaje de entrada	5-12V
Pines digitales	54
Pines PWM	12
Entradas analógicas	12

CONTINÚA →

Memoria flash	512K
Frecuencia Reloj	84MHz

Fuente: (Arduino, 2015)

- Tarjeta de Control

La tarjeta de control es el cerebro del robot móvil, desde la misma deben salir las diferentes órdenes, debe tomar ciertas decisiones, y desde ella se va a realizar la comunicación entre los robots de la red.

- **Diseño del sistema:**

Para realizar la elección de la tarjeta de control se consideran diferentes mini ordenadores comerciales, estos tienen poco procesamiento con respecto a los ordenadores personales o de escritorio pero más procesamiento que las tarjetas de adquisición, mismas que también pueden realizar procesos de control.

Intel es una corporación importante en la fabricación de circuitos integrados, entre sus productos ofrecen los miniordenadores NUC de 10 centímetros de largo y ancho siendo una opción para obtener buen procesamiento en espacio reducido como se puede ver en la Figura 34. Se puede encontrar variedad de características en su catálogo desde placas madre hasta ordenadores completos.



Figura 34 Miniordenador Intel NUC

Fuente: (Intel, 2018)

Otra opción de mini ordenadores son los que ofrece la empresa Raspberry, se le puede considerar una placa flexible para diferentes sistemas operativos de licencia abierta. De igual manera se tiene un vasto catálogo donde se pueden encontrar placas con diferentes características. Las placas Raspberry son utilizadas para la enseñanza de informática o para la construcción de prototipos industriales, sus placas son de tamaño reducido como se puede observar en la Figura 35.



Figura 35 Raspberry Pi3

Fuente: (Raspberry, 2018)

- **Análisis y decisión:**

Se analizan las opciones para la tarjeta de control, de igual manera se tiene una matriz de selección donde se analizan las características más relevantes del proyecto. Las columnas de la Tabla 22 corresponden a los siguientes literales.

A. Intel NUC

B. Raspberry Pi

Tabla 22

Matriz de selección de tarjeta de control

Criterios de Selección	Peso	A		B	
		Ca	Ep	Ca	Ep
Licencia Abierta	40%	4	1.6	5	2
Flexible	20%	4	0.8	4	0.8

CONTINÚA →

Escalable	20%	4	0.8	3	0.6
Costo	20%	2	0.4	5	1
Total de Puntos		3.6		4.4	

Dado que la comunidad que desarrollan aplicaciones con Raspberry tiene la filosofía de licencia abierta se opta por la utilización de estos miniordenadores, como se observa en la matriz de selección esta característica es la que marca diferencia con la otra opción de tarjeta de control. El modelo de la placa que se elige para el trabajo es la Raspberry Pi3 B+, misma que se muestra en la Figura 36 y sus características se presentan en la Tabla 23.



Figura 36 Raspberry modelo Pi3 B+

Fuente: (Raspberry, 2018)

Tabla 23

Características Raspberry Pi3 B+

CARACTERÍSTICAS DE LA PLACA	
CPU	Broadcom BCM2837B0
GPU	Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz
Wi-Fi	2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b
Bluetooth	4.2, BLE
USB 2.0	4 puertos
Ethernet	Gigabit Ethernet (300 Mbps)
GPIO	40 pines

Fuente: (Raspberry, 2018)

3.4.3. Diseño Electrónico

○ Análisis Energético

Ya determinados los elementos electrónicos se necesita la elección de la fuente para los robots autónomos en el ámbito energético. Esto significa que deben tener una batería interna.

• Diseño del sistema:

Tabla 24

Tabla de consumo energético

Elemento eléctrico	Cantidad	Voltaje	Corriente	Corriente máx.
Motores	4	6-12 [V]	0.75 [A]	3 [A]
Arduino DUE	1	7-12 [V]	0.8 [A]	0.8 [A]
Raspberry Pi3*	1	5 [V]	1.5 [A]	1.5 [A]
Encoder	4	5 [V]	0.2 [A]	0.8[A]
IMU	1	3.3-5.5 [V]	0.1[A]	0.1[A]
Total de corriente				6.2 [A]

En la Tabla 24 se muestran todos los elementos que necesitan ser energizados, la cantidad de voltaje que requieren y la corriente máxima que necesitan para funcionar en condiciones extremas. Se toma en cuenta que la corriente de la Raspberry es valorada sin conexión de periféricos. Otra consideración importante es la inclusión de módulos de puente H para realizar el control de velocidad del motor, el cambio de giro y la elevación de corriente cuando esta sea necesaria, sus características se evidencian en la Figura 37 .

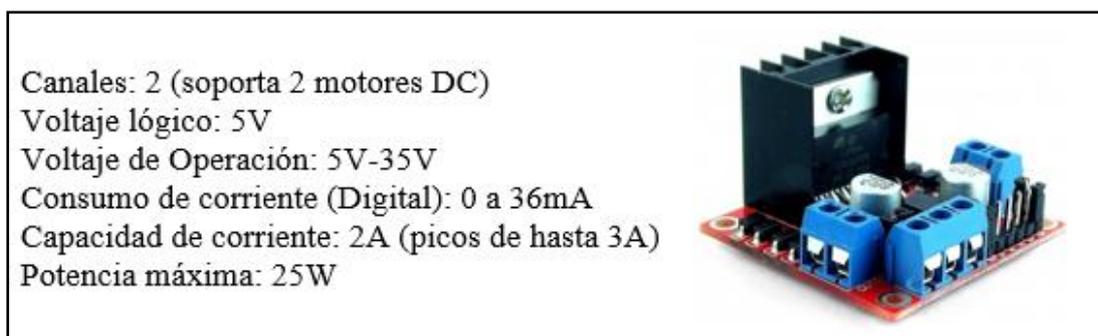


Figura 37 Especificaciones Puente H L298

Fuente: (CQRobot, 2017)

- **Análisis y decisión:**

La necesidad de corriente es de 6.2 A, pero se puede discriminar dos elementos que tienen una mayor carga energética, por lo que se plantea hacer una división de elementos para colocar dos baterías, dando como resultado un ahorro económico y de espacio. A continuación en la Figura 38 se presentan las baterías que se van a utilizar.



Figura 38 Baterías del Robot Móvil

Fuente: (Punto Flotante, 2006)

Cada una de las baterías tienen un grupo de elementos para energizar, en la Figura 39 se explica con un esquema las conexiones y las regulaciones de voltaje que necesitan algunos elementos

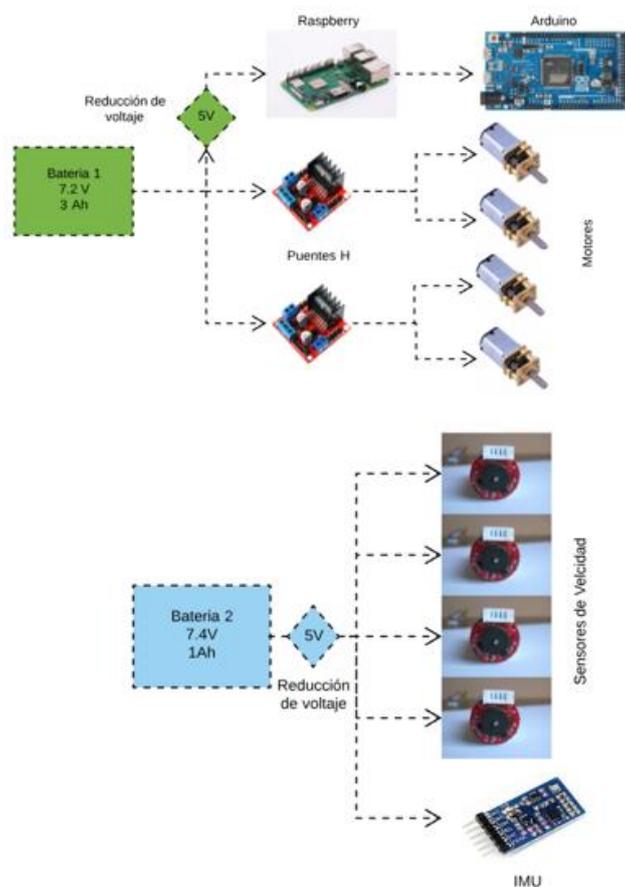


Figura 39 Esquema de energización del sistema
Realizado en Lucidchart

○ Diseño de PCB

Con todos los componentes electrónicos seleccionados se debe diseñar una placa PCB donde se realicen todas las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento de cada robot. Para realizar este diseño se utiliza el programa Eagle de Autodesk, dando como resultado el esquema presentado en la Figura 40 donde la línea azul encierra los elementos dedicados a la energización, la línea naranja contiene los elementos encargados de la locomoción del robot y la línea verde los elementos que controlan el sistema.

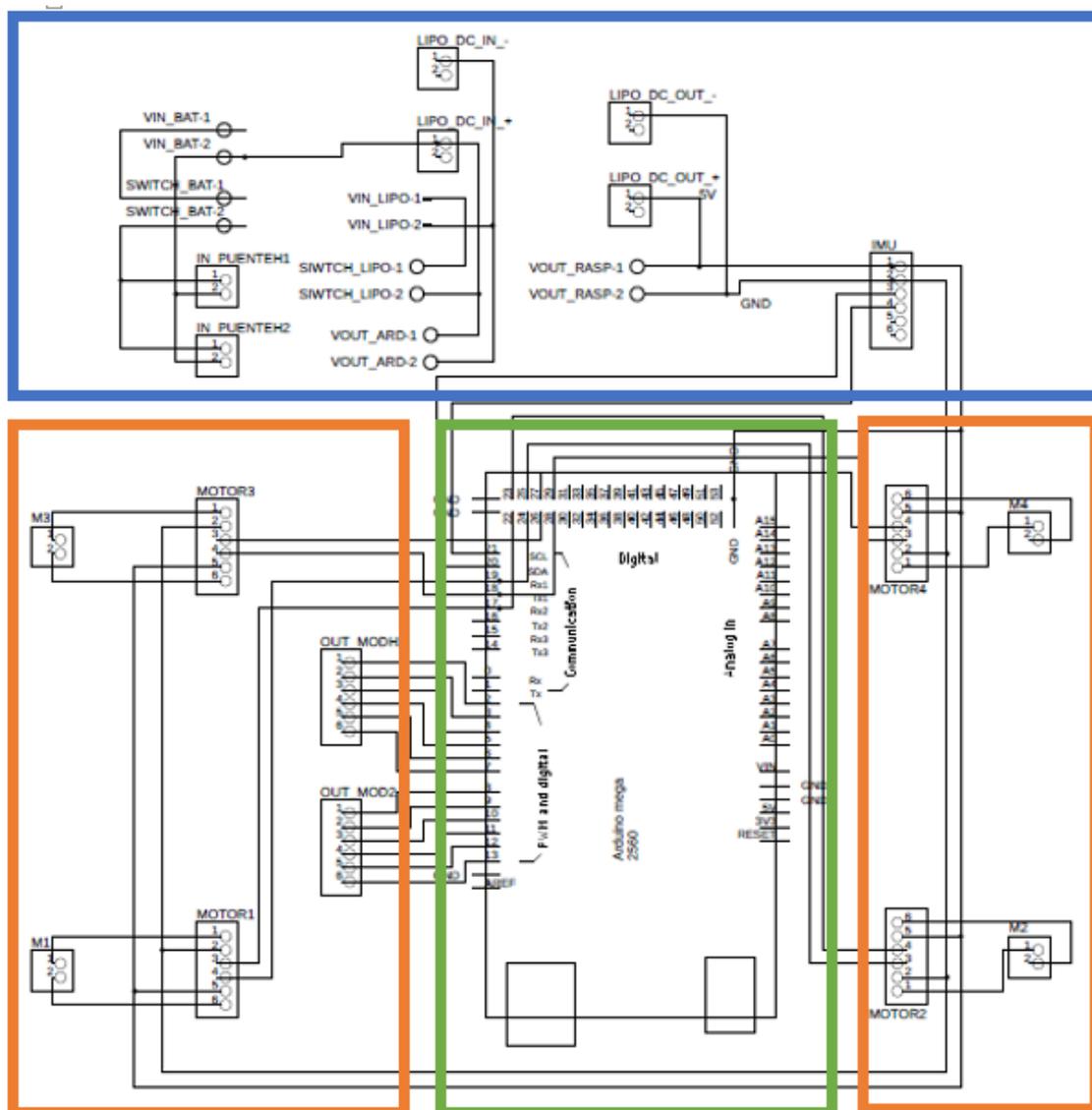


Figura 40 Esquema de bloques de la placa electrónica
Realizado en Eagle

Para la fabricación de la placa electrónica se extrae el diseño realizado que se muestra en la Figura 41, este diseño es el que pasa al proceso de grabado en una placa de cobre mediante ácido férrico. La placa electrónica tiene una dimensión de 22 cm de largo y 11 de ancho, la ubicación de cada uno de los pines fue diseñada para que este lo más cercano posible a los elementos correspondientes.

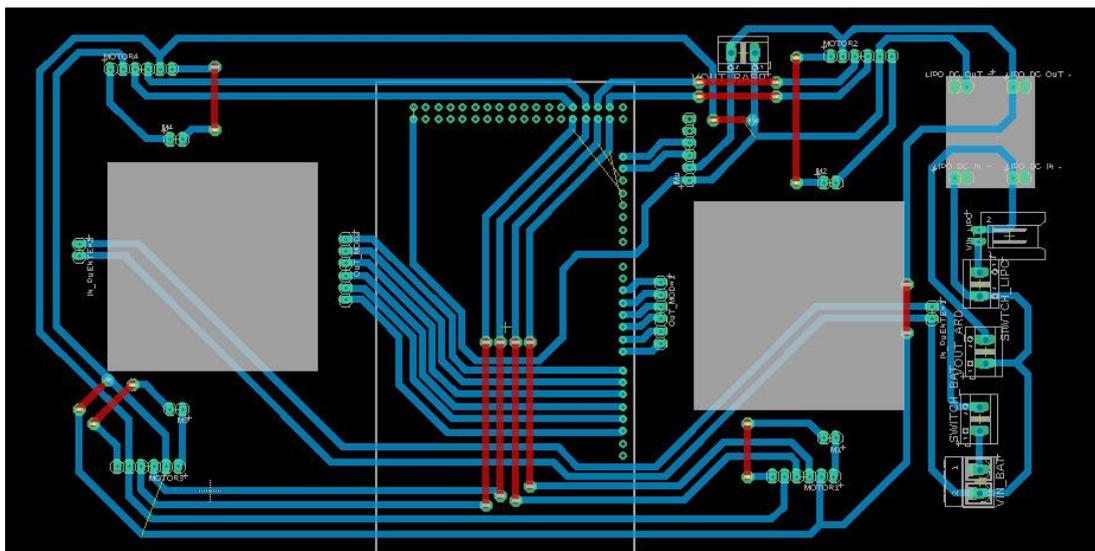


Figura 41 Diseño de la PCB
Realizado en Eagle

Verificación y resultados:

Como resultados en este subsistema tenemos la elección de diferentes componentes los cuales se enlistan a continuación.

- Sensor Encoder
- Sensor IMU
- Puente H L298
- Arduino DUE
- Raspberry Pi3B+
- Batería 1000 mAh
- Batería 3000 mAh

Su validación viene dada por la finalidad que cada elemento tendrá en el proyecto, antes de seguir con los siguientes subsistemas se necesita realizar una integración con el subsistema mecánico ya definido en el documento. Para las baterías se diseñan dos carcasas con diferentes características como se presentan en la Figura 42. Cada diseño es considerado para facilitar el

cambio de baterías y la recarga según estas necesitan, los planos correspondientes y las especificaciones técnicas de como retirar los elementos se presentan en la sección Anexos.

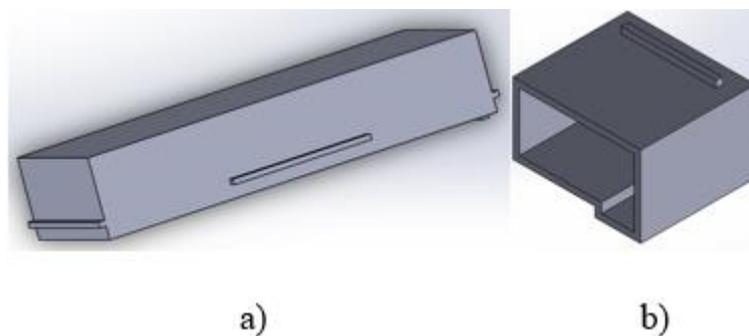


Figura 42 a) Case batería 3A b) Case batería LIPO

Para la fijación de los demás elementos se utiliza directamente pines o puertos colocados en la placa electrónica, finalmente en la base del robot se realizan los cambios necesarios para albergar los nuevos materiales de esta sección. En la Figura 43 se muestra el diseño la base del robot móvil terminada donde se especifica diferentes modificaciones.

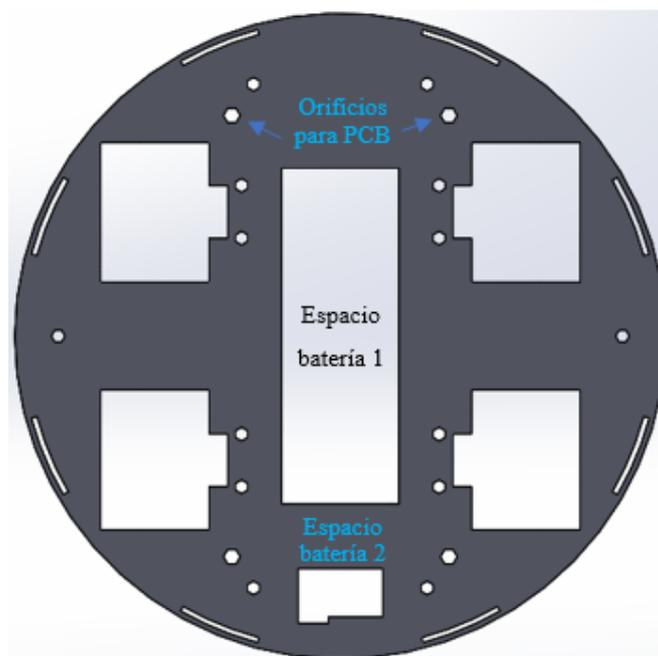


Figura 43 Base del robot final

Se finaliza esta sección presentando la Figura 44 que representa en análisis en modelo en V del subsistema eléctrico, con los elementos obtenidos y las conclusiones que se tienen en la validación de los elementos.

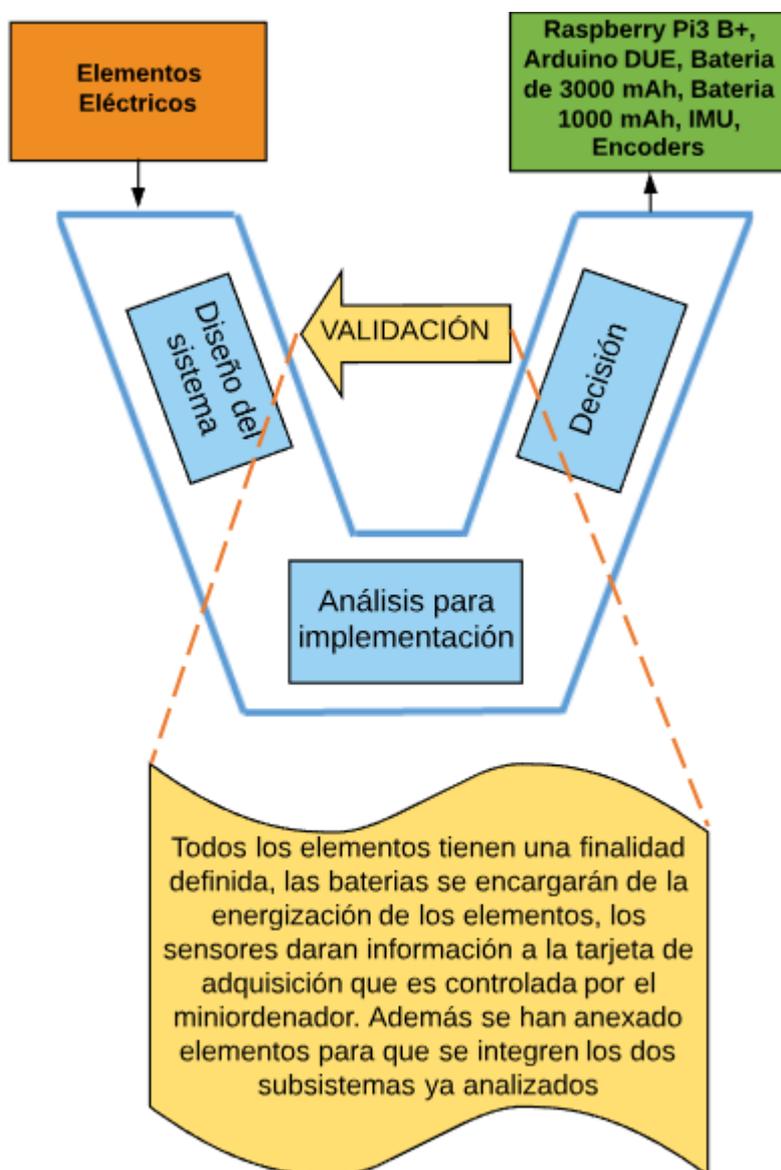


Figura 44 Validación del Modelo en V Sobre Elementos Eléctricos
Realizado en Lucidichart

3.5. Subsistema de Control

El subsistema de control permite el funcionamiento en conjunto de los elementos mecánicos y los elementos electrónicos, esta se aplica en la plataforma mediante la interacción de una

tarjeta de desarrollo en este caso Raspberry Pi y una tarjeta de adquisición de datos Arduino DUE. El Arduino estará a cargo del control de los elementos de locomoción, motores, puentes H, los elementos de orientación IMU

3.5.1. Odometría

La odometría permite el conocimiento de la ubicación de un robot móvil, mediante la medición de las revoluciones que se realizan en los motores, en este caso el dato de las revoluciones viene dado por los encoders que tiene el robot móvil en sus motores. Para obtener la odometría de un robot móvil se debe tener ciertos parámetros que se presentan a continuación.

- Cinemática

Se realiza el desarrollo de la cinemática para un robot móvil omnidireccional, esta configuración nos permite realizar direcciones rectilíneas que facilitan el movimiento de los robots móviles al momento de alcanzar una meta, por lo tanto, se produce una ventaja sobre las otras configuraciones de robots móviles.

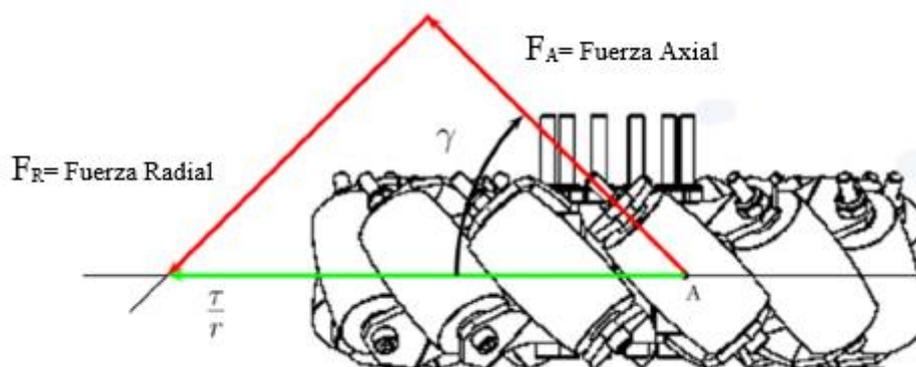


Figura 45 Fuerzas en una rueda omnidireccional

Fuente: (J. Plumpton, 2014)

La Figura 45 muestra los ángulos de las fuerzas que permiten el movimiento del robot móvil en configuración omnidireccional, F_A es la fuerza axial, F_R es la fuerza radial mientras que γ es

el ángulo entre las fuerzas de acuerdo a la conformación de los rodillos de cada rueda siendo este 45° , la resultante de estos vectores es la fuerza tangencial de la rueda para ese punto.

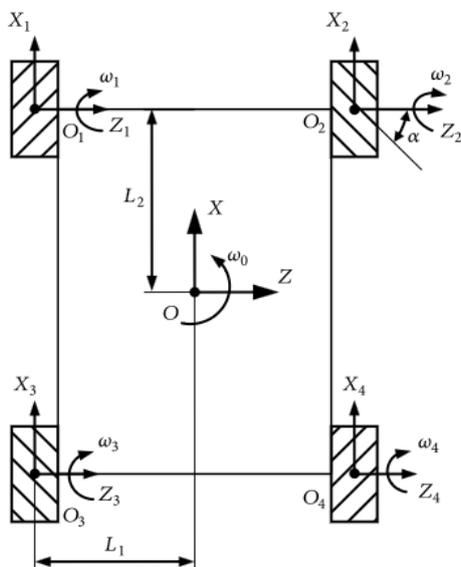


Figura 46 Cinemática del robot omnidireccional

La Figura 46 muestra los ejes sobre los cuales se analizará la cinemática para un robot móvil con configuración omnidireccional de llantas mecanum suecas, se establece la numeración de cada llanta asignando un eje coordenado, se establece el eje coordenado en el centro del robot móvil. Asumimos como condiciones ideales, el robot móvil se traslada en un plano horizontal, el robot móvil no patina sobre el suelo, de acuerdo a estas ecuaciones presentamos el análisis cinemático.

$$V_w = J(\alpha) * V_o \quad (1)$$

Donde:

$$V_w = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]^T \quad (2)$$

$$V_o = [v_x \ v_y \ w_o]^T \quad (3)$$

$J(\alpha)$ es la matriz jacobiana que nos permite transformar las velocidades angulares a velocidades lineales teniendo en cuenta que colocamos el eje coordenado XOZ en el centro del robot, obtenemos la cinemática directa.

$$J(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & -\frac{L1 * \tan \alpha + L2}{\tan \alpha} \\ 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & \frac{L1 * \tan \alpha + L2}{\tan \alpha} \\ 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & -\frac{L1 * \tan \alpha + L2}{\tan \alpha} \\ 1 & \frac{1}{\tan \alpha} & \frac{L1 * \tan \alpha + L2}{\tan \alpha} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La expresión general de una matriz inversa es

$$J(\alpha)^+ = (J(\alpha)^T J(\alpha))^{-1} J(\alpha)^T \quad (5)$$

En el modelo obtenido se tiene que $\alpha = 45$ por lo tanto obtenemos la cinemática inversa del sistema

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w_z \end{bmatrix} = \frac{r}{4} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{L1 + L2} & \frac{1}{L1 + L2} & -\frac{1}{L1 + L2} & \frac{1}{L1 + L2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (4) obtenemos las velocidades angulares de cada rueda del robot móvil.

$$\begin{cases} w_1 = \frac{1}{r} (v_x - v_y - (L1 + L2)w_z) \\ w_2 = \frac{1}{r} (v_x + v_y + (L1 + L2)w_z) \\ w_3 = \frac{1}{r} (v_x + v_y - (L1 + L2)w_z) \\ w_4 = \frac{1}{r} (v_x - v_y + (L1 + L2)w_z) \end{cases} \quad (7)$$

De la ecuación 6 obtenemos las siguientes ecuaciones:

Velocidad longitudinal

$$v_y(t) = (w_1 + w_2 + w_3 + w_4) * \frac{r}{4} \quad (8)$$

Velocidad transversal

$$v_x(t) = (-w_1 + w_2 + w_3 - w_4) * \frac{r}{4} \quad (9)$$

Velocidad Angular

$$w_z(t) = (-w_1 + w_2 - w_3 + w_4) * \frac{r}{4(L1 + L2)} \quad (10)$$

Este modelo cinemático ha sido tomado de (Yunwang Li, 2018).

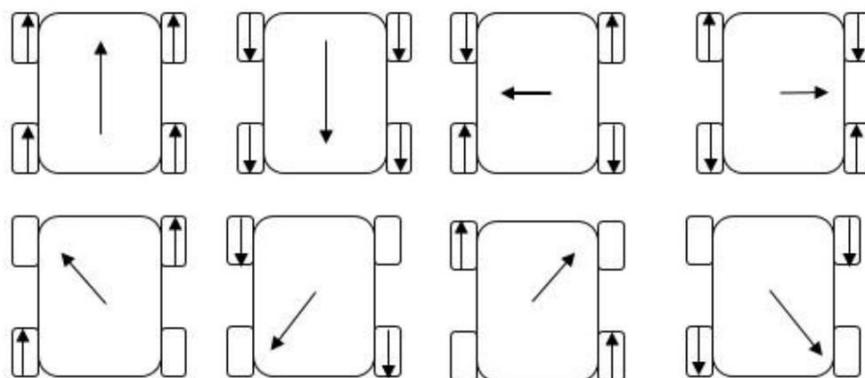


Figura 47 Direcciones según sentido de giro de las ruedas
Fuente: (Hamid Taheri, 2015)

La Figura 47 muestra los movimientos del robot móvil, esta configuración permite movimientos rectilíneos de acuerdo a los distintos movimientos de las llantas, se presenta la

Tabla 25 a continuación donde se especifican de manera numérica las velocidades en m/s que se esperan obtener en los diferentes ejes según el tipo de movimiento.

Tabla 25
Velocidades en los ejes según su dirección

Dirección	v_y	v_x	w_z
Adelante	0.2	0	0
Atrás	-0.2	0	0
Izquierda	0	0.2	0
Derecha	0	-0.2	0
Diagonal Iz/Ad	0.2	0.2	0
Diagonal Iz/At	-0.2	0.2	0
Diagonal De/Ad	0.2	-0.2	0
Diagonal De/At	-0.2	-0.2	0

3.5.2. Localización y navegación

La localización se realiza por medio de una unidad de medición inercial IMU, nos permite la corrección de la trayectoria, se realiza una fusión de datos entre los magnetómetros, giroscopios y mediciones de gravedad, esto nos da una lectura de los ángulos de Euler roll, pitch y yaw, el ángulo de interés para la plataforma es yaw.

Siendo Linorobot la plataforma base sobre la cual se construyeron los robots móviles, hace uso de los servicios de localización y odometría. Se realiza la filtración de la señal para la obtención de datos de la IMU por medio del filtro de Madgwick. Para una localización precisa se realiza la interpolación de datos entre odometría y el sensor IMU, esto se obtiene mediante el filtro de Kalman extendido.

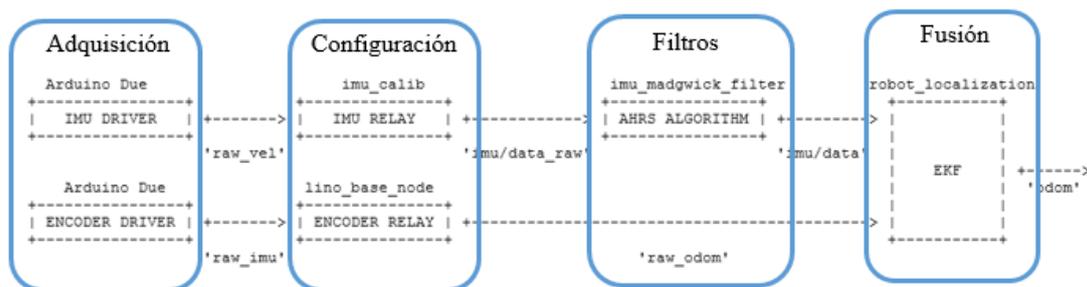


Figura 48 Estructura de adquisición de datos

La Figura 48 nos muestra la estructura propuesta por Linorobot para la adquisición de datos desde el Arduino. El recuadro “Adquisición” presenta el muestreo las señales sin filtrar tanto del sensor IMU y de los encoders, estos datos se transmiten a la Raspberry Pi mediante los mensajes de ROS “raw_vel” y “raw_imu”. “Configuración” nos permite definir los valores iniciales para el arranque de los sensores, en el caso de la IMU son los valores obtenidos previa calibración, en el caso de los encoders la configuración y el tipo de robot móvil que vamos a utilizar. En la sección “Filtros” se aplican algoritmos que nos ayuda a una obtención de una señal filtrada para el sensor IMU. Finalmente en “Fusión” por medio del filtro de Kalman extendido nos permite fusionar los datos obtenidos desde el sensor IMU y los encoders para la obtención de una localización precisa del robot móvil.

Arquitectura de software Arduino.

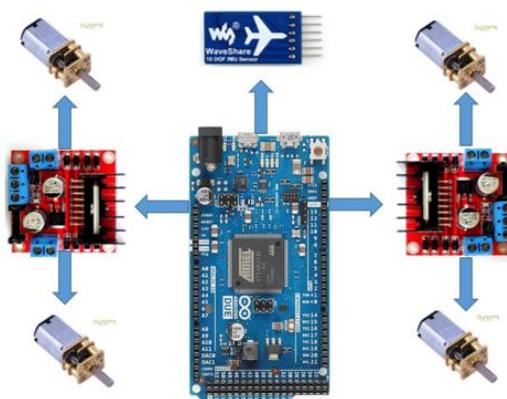


Figura 49 Arquitectura Arduino/software

La placa de desarrollo Arduino dentro del robot móvil está estructurado de acuerdo a la Figura 49, nos presenta una conexión entre el Arduino y el puente h por medio de 3 pines los cuales permiten el control por PWM de velocidad y el cambio de giro respectivo, el puente H L298 realiza el control de dos motores simultáneamente.

El sensor IMU se comunica con la placa Arduino mediante el protocolo I2C, este protocolo tiene una funcionalidad maestro esclavo en donde el maestro crea una señal de reloj mediante la cual se sincronizan los dispositivos.

3.5.3. Controladores

Se desarrollan dos tipos de controladores para la velocidad y corrección de la trayectoria móvil, se propone realizar un controlador de tipo PID independiente para cada motor del robot móvil y un controlador ON/OFF para la corrección de orientación del mismo, utilizando el esquema de controlador de la Figura 50

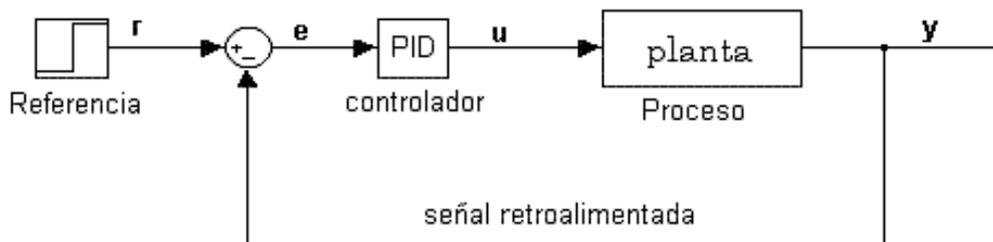


Figura 50 Esquema del controlador PID

- **Controlador de los motores**

Análisis eléctrico

Para el análisis eléctrico se conoce el circuito básico de funcionamiento de motor dc como se puede observar en la Figura 51:

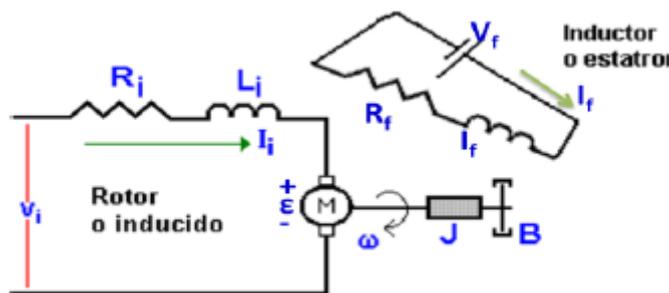


Figura 51 Circuito general de un motor DC

Fuente: (Alvarez, 2012)

El voltaje E que es la denominada fuerza contraelectromotriz y se encuentra definida por:

$$E = K_b \phi \omega(t) \quad (11)$$

Dado que el flujo es constante la ecuación 11 se puede escribir de la siguiente forma:

$$E = K_b \omega(t) \quad (12)$$

Siendo K_b [Vs/rad] la constante de la fuerza contraelectromotriz que se obtiene de la siguiente forma:

$$K_b = \frac{U_a - R_a i_a}{\omega} \quad (13)$$

Realizando el análisis de la malla la tensión útil es:

$$U_a - K_b \cdot \omega(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} \quad (14)$$

Análisis mecánico

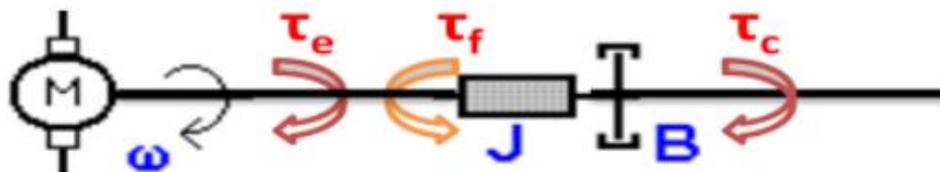


Figura 52 Diagrama de torques en el rotor

Fuente: (Alvarez, 2012)

Debido al torque electromagnético τ_e generado por el campo magnético del estator, el rotor realiza su movimiento, este torque se relaciona con la corriente de armadura como se ilustra en la Figura 52, teniendo entonces:

$$\tau_e = K_m \cdot i_a(t) \quad (15)$$

Siendo $K_m = \frac{T_m(s)}{I_a(s)}$ [Nm/A] la constante de torque electromagnético, que en motores dc toma el mismo valor que la constante de fuerza contraelectromotriz con diferentes unidades.

El motor siempre maneja una carga, esta carga debido al su movimiento giratorio genera un torque τ_c , también se tiene una fricción que depende de la velocidad angular del rotor, la cual genera un torque τ_f , sus ecuaciones de definen por:

$$\tau_c = J_m \cdot \alpha = J_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (16)$$

$$\tau_f = B \cdot \omega(t) \quad (17)$$

Siendo J_m la inercia del motor, y B el coeficiente de amortiguamiento definido por $B = \frac{K_m l}{\omega}$. (Sanchez, Cabrera, & García, 2014)

Realizando la sumatoria de torques se obtiene entonces:

$$\sum \tau = J_m \cdot \alpha \quad (18)$$

$$\tau_e - \tau_f = \tau_c \quad (19)$$

Reemplazando el (19) las ecuaciones (15), (16) y (17) se obtiene:

$$\tau_e - B \cdot \omega(t) = J_m \cdot \alpha \quad (20)$$

$$\tau_e = J_m \cdot \alpha + B \cdot \omega(t) \quad (21)$$

Definición de ecuaciones del sistema:

En el dominio del tiempo

$$\tau_e = J_m \cdot \alpha - B \cdot \omega(t) \quad (22)$$

$$U_a - K_b \cdot \omega(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} \quad (23)$$

$$\tau_e = K_m \cdot i_a(t) \quad (24)$$

$$\tau_e = J_m \cdot \alpha - B \cdot \omega(t) \quad (25)$$

En el dominio de S

$$E(s) = K_b \cdot \omega(s) \quad (26)$$

$$U_a(s) - K_b \cdot \omega(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot s \cdot I_a(s) \quad (27)$$

$$T_e(s) = K_m \cdot I_a(s) \quad (28)$$

$$T_e(s) = J_m \cdot s^2 \cdot \theta(s) - B \cdot s \cdot \theta(s) = s \cdot \theta(s) \cdot [J_m \cdot s - B] \quad (29)$$

Modelamiento y controlador

Realizamos la adquisición de datos por medio del arduino, este método consiste en aplicar sobre un sistema en equilibrio, una entrada en forma de escalón y observar la respuesta del mismo. Posteriormente se analiza esta respuesta, obteniendo un polinomio denominado “función de transferencia” que pretende ser un fiel reflejo del comportamiento del proceso, el resultado se muestra en la ecuación (30):

$$\frac{0.489}{0.94 s + 4.997} \quad (30)$$

Por medio de sintonización Cohen y Coon aplicaron los criterios simples (1/4 de decaimiento; minimización de offset y minimización de ISE) para obtener los "mejores" valores de los parámetros del controlador en bucle cerrado.

Se realizan cálculos que arroja un conjunto de valores "recomendables" para los parámetros de cualquiera de los tres tipos de controlador PID con las ecuaciones

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right) \quad (31)$$

$$\tau_c = \theta \frac{32 + 6 \frac{\theta}{\tau}}{13 + 8 \frac{\theta}{\tau}} \quad (32)$$

$$T_e(s) = \theta \frac{4}{11 + 2 \frac{\theta}{\tau}} \quad (33)$$

Donde:

$K = \text{Ganancia estática}$

$\tau = \text{Tiempo de respuesta}$

$\theta = \text{Tiempo de retardo}$

Resolviendo las ecuaciones tenemos los siguientes resultados de las constantes del controlador:

- P: 1.6
- I: 0.5
- D: 0.3

Obteniendo como resultados la Figura 53. Cuando el robot móvil se mueve hacia adelante, la gráfica muestra velocidad en función del tiempo, la línea azul representa la velocidad del robot móvil en el eje Y, la línea roja es la velocidad en el eje X y la línea turquesa la velocidad angular en el eje Z. Todas las gráficas del controlador se realizan con un step de 0.2 m/s.

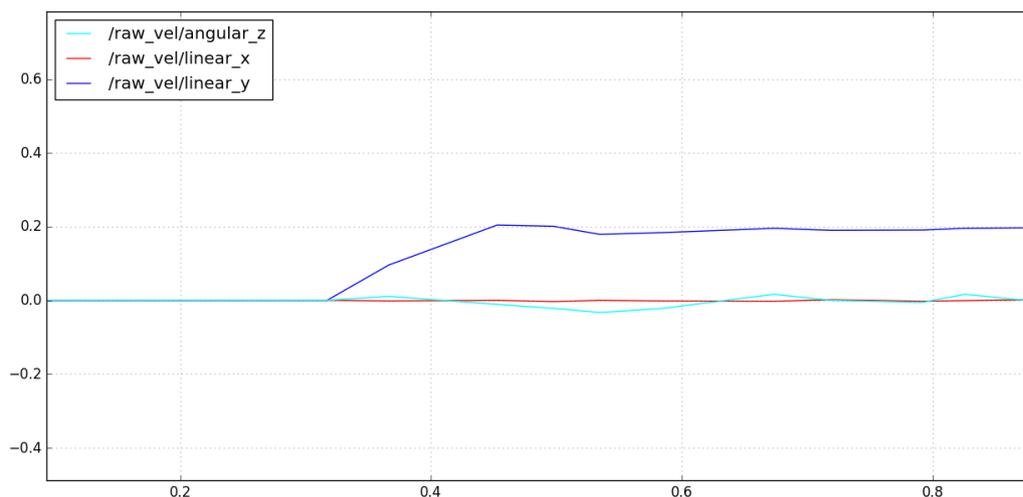


Figura 53 Gráfica del controlador movimiento hacia adelante

En la Figura 54 se muestra la respuesta del controlador cuando el robot móvil se mueve hacia la izquierda, las características son idénticas a la gráfica anterior.

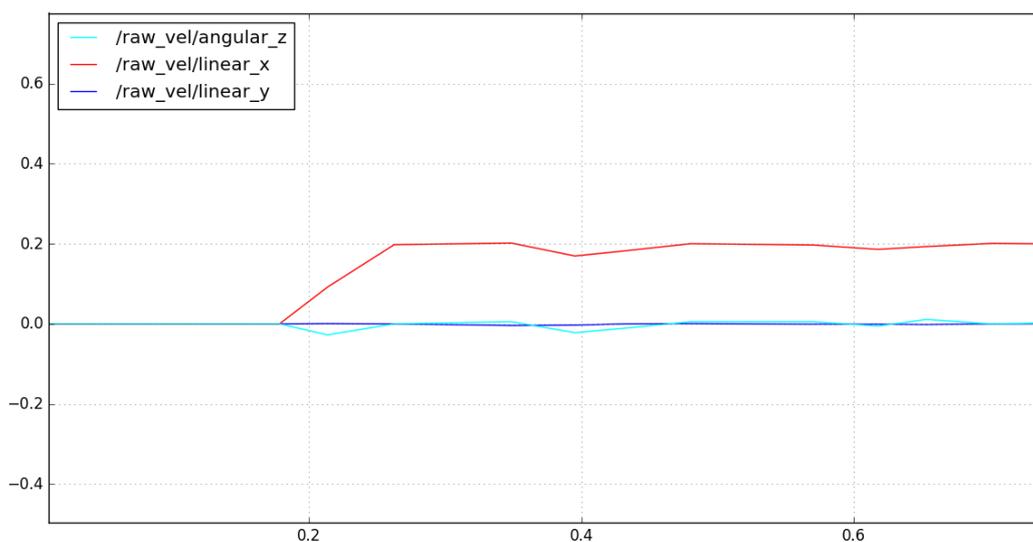


Figura 54 Gráfica del controlador movimiento hacia la izquierda

En la Figura 55 se muestra la respuesta del controlador cuando el robot móvil se mueve realizando una diagonal por izquierda hacia adelante, Nótese que las líneas azul y roja realizan un comportamiento idéntico.

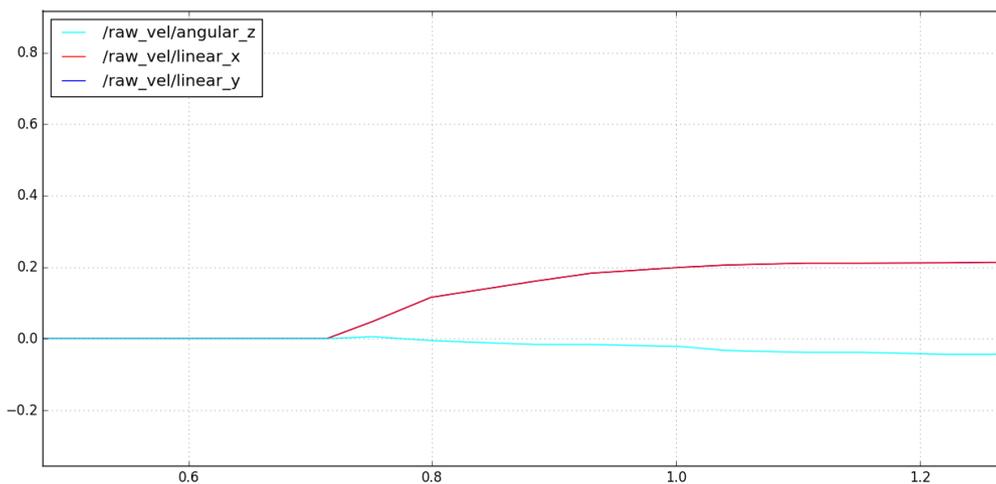


Figura 55 Gráfica del controlador movimiento diagonal

En la Figura 56 se muestra la respuesta del controlador cuando el robot móvil se mueve realizando una diagonal por la derecha y hacia adelante, Nótese que las líneas azul y roja realizan un comportamiento simétrico.

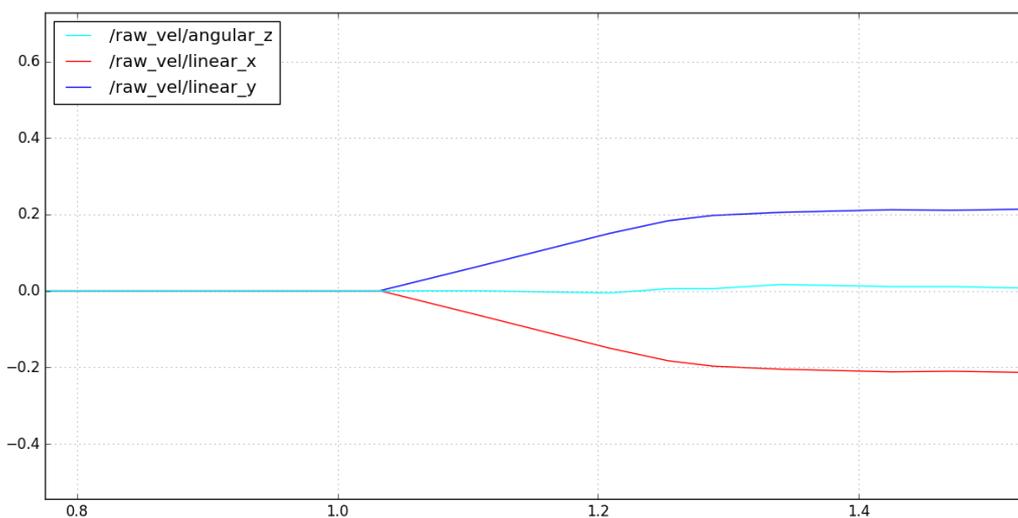


Figura 56 Gráfica del controlador movimiento diagonal negativo

Los demás movimientos del robot presentan resultados similares pero en diferente sentido por lo que no se presentan en el documento, con las cuatro gráficas obtenidas se puede concluir que el controlador funciona correctamente debido que tiene respuesta rápida y no presenta inconvenientes que afecten al movimiento del robot móvil.

- **Controlador de Orientación**

El controlador ON/OFF de acuerdo al esquema presentado en la Figura 50 nos permite realizar un algoritmo de control presentado en la Figura 57:

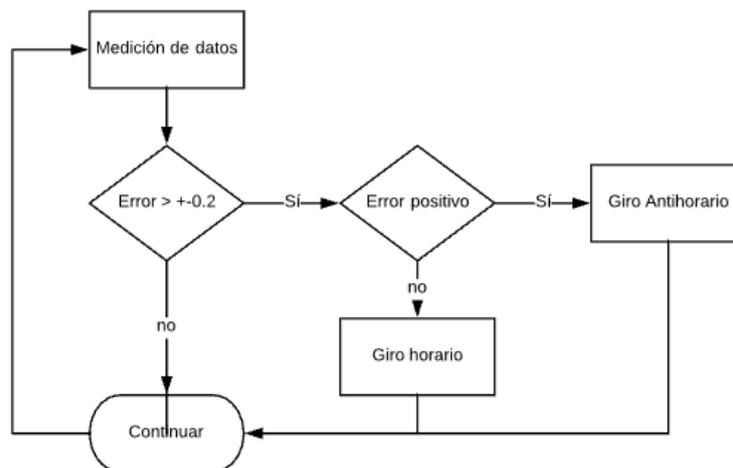


Figura 57 Diagrama de flujo controlador On/Off

Este algoritmo es implementado para la corrección de la trayectoria del robot móvil, realizando la lectura del sensor IMU de acuerdo a los datos obtenidos se procede a tomar acciones de giros en sentido horario o anti horario según el caso, priorizando esta corrección por sobre las órdenes de movimiento rectilíneo.

3.6. Subsistema TICs

Requerimientos

Dentro de los sistemas de comunicación existen diferentes componentes, dispositivos, red, protocolo y servicios.

3.6.1. Implementación

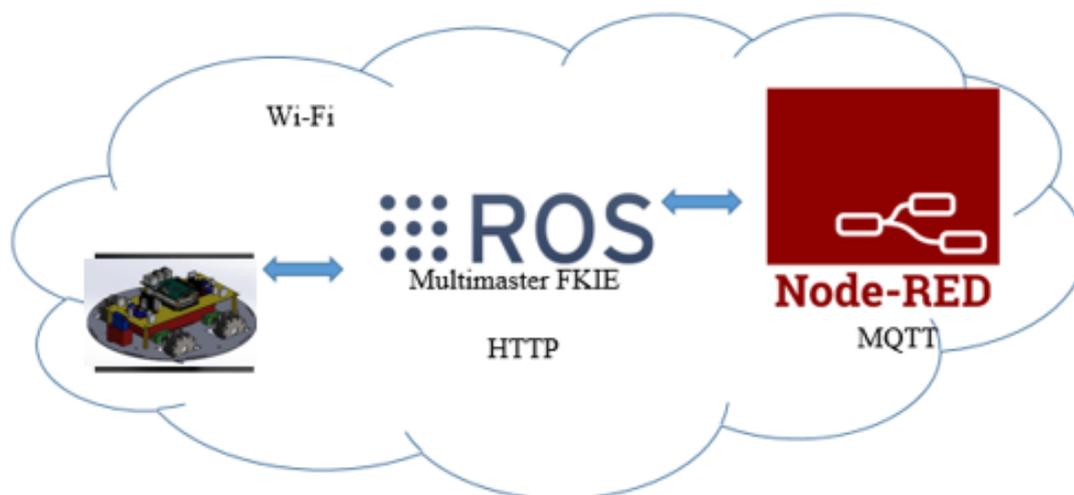


Figura 58 Plataforma del sistema de comunicación

La Figura 58 ilustra la composición del sistema de comunicación de la plataforma, se observa los componentes de un sistema de comunicación, tenemos una red Wi-fi la cual engloba los elementos interconectados desde el dispositivo móvil con el software de comunicación y sus respectivos protocolos.

Multimaster FKIE

Es un conjunto de nodos que permite establecer la comunicación y administración de diferentes ROS masters, para la creación de una red local de robots ROS comunicados entre ellos para la difusión de información relevante en el cumplimiento de tareas específicas, utiliza un protocolo HTTP mediante una red Wi-fi, bluetooth entre otras. (Sergi Hernandez Juan, 2015)

Cada robot tiene un roscore el cual gestiona por medio de ros cada parte de la plataforma móvil, por medio del uso de tópicos y nodos conectamos en red todas las prestaciones del robot para poder ser administradas por el roscore. Multimaster permite la comunicación entre roscore con la posibilidad de publicar y suscribir tópicos en los diferentes roscore inicializado. Figura 59 nos muestra un entorno genérico de diferentes nodos administrados por un solo roscore.

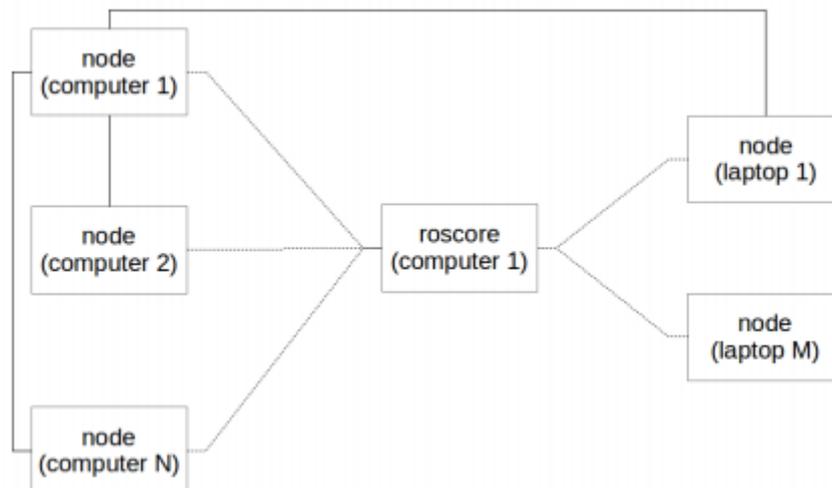


Figura 59 Estructura de tópicos y nodos
Fuente: (Sergi Hernandez Juan, 2015)

Dentro de los requerimientos para la plataforma se pide un tipo de red descentralizada, entendiendo por descentralizada la comunicación independiente entre cada robot, presentamos un esquema genérico de una red local multimaster como se puede ver en la Figura 60, esto nos permite el intercambio de información entre nodos y tópicos de distintos robots.

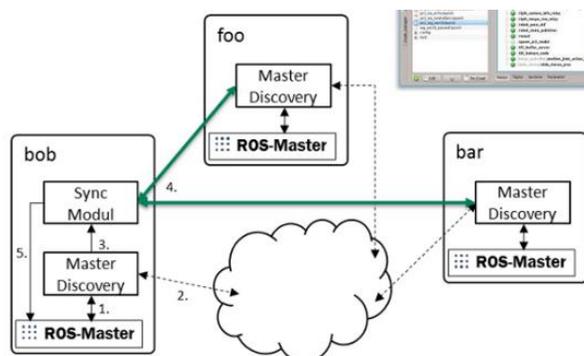


Figura 60 Red local multimaster
Fuente: (Sergi Hernandez Juan, 2015)

3.6.2. Node Red

Es una herramienta la cual permite la integración del protocolo MQTT con una interfaz amigable para el usuario. Permite el desarrollo de aplicaciones y flujos de trabajo mediante el

uso de tópicos y nodos para la comunicación global del desarrollo de aplicaciones. (JS Foundation., 2018)

MQTT es un protocolo que fue diseñado para conectividad entre máquinas, con el objetivo que el transporte de mensajería sea ligero, para facilitar el envío de información y reducir el consumo de energía. Es ideal para trabajos con Internet de la cosas, conexión de redes de sensores entre otros servicios, tiene una estructura de nodos y tópicos permitiendo el enlace con otras plataformas de similar estructura. (MQTT.ORG, 2018).

Mosquitto es un intermediario para la interpretación del protocolo MQTT lo cual facilita estructurar los componentes del protocolo para la realización del método de publicación suscripción aplicado en nodos y tópicos siendo Mosquitto bróker en la estructura de comunicación, tiene código abierto y es desarrollado por eclipse. (Eclipse Foundation, 2018).



Figura 61 Conexión de elementos mediante MQTT

La Figura 61 nos presenta los elementos de comunicación que se utilizan para una conexión mediante el protocolo MQTT. En el recuadro azul “Interfaz” nos muestra Node Red junto con el dashboard que permiten monitoreo y control de la plataforma móvil. En “Protocolo” nos muestra el protocolo usado MQTT junto con su intérprete mosquitto, “Red” nos muestra la red

por la cual el dispositivo se conecta a estos servicios en este caso Wi-Fi, todos estos elementos interactúan gracias a un servicio, como nos muestra el cuadro verde, de internet es una red local.

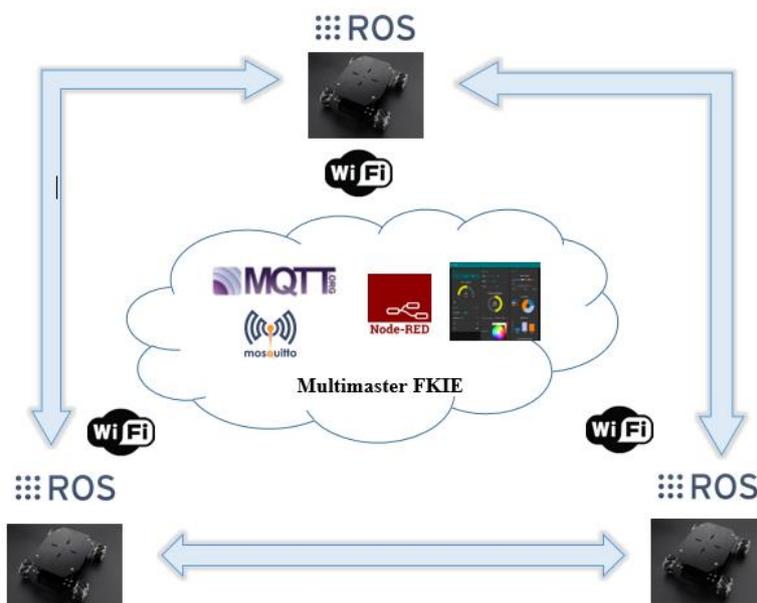


Figura 62 Esquema de comunicación de la plataforma multirobot

La Figura 62 nos muestra la implementación propuesta para la comunicación entre los diferentes robots móviles, se encuentra estructurada por los 3 robots móviles, los cuales cuentan con conexión a una red Wi-Fi local, realizan el intercambio de información mediante el paquete de ROS multimaster FKIE, este se encuentra conectado en la red mediante el protocolo MQTT a Node Red que nos permite un monitoreo y control de la plataforma en una red global mediante el servicio de internet.

3.6.3. Flujogramas de funcionamiento interno

El flujograma que se muestra en la Figura 63 ilustra los nodos que cada ente robótico debe inicializar en su sistema operativo para empezar a operar. El nodo de conectividad con Node-Red hace que el robot sea parte de la red colaborativa, Rosbridge es el puente de conexión para utilizar el protocolo MQTT en ROS. Finalmente cada robot debe verificar la lectura de sus sensores y actuadores, en este caso con los encoders, con la IMU y con sus motores. Cuando

todos estos nodos están funcionando el robot espera que se envíe una orden para empezar a tomar decisiones.

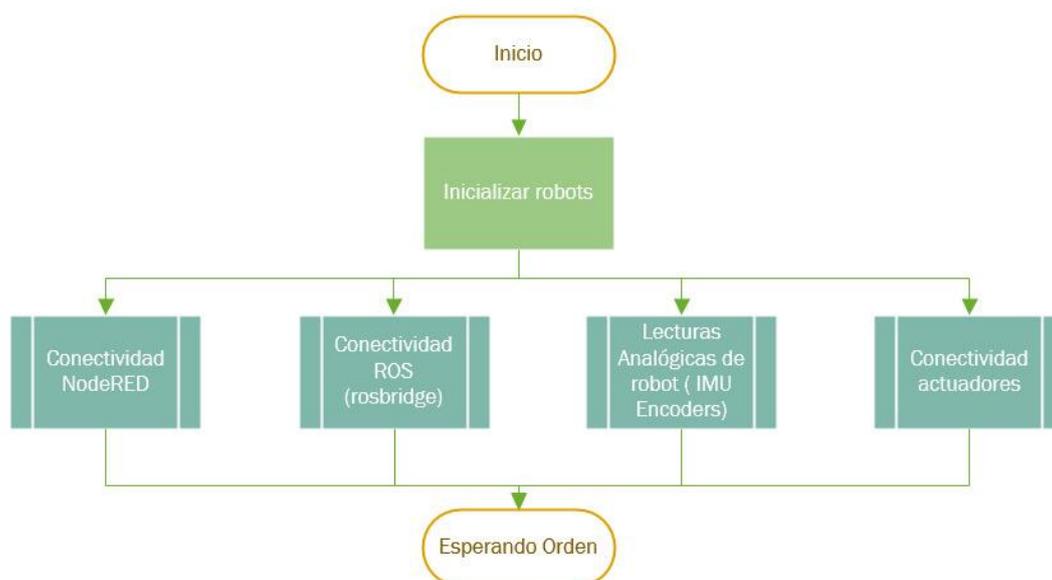


Figura 63 Flujograma de inicialización

Existen procesos que se realizan internamente en cada robot que influyen en su funcionamiento final como se muestra en la Figura 64 donde se evalúa la red. Este proceso sirve para saber cuántos robots están conectados en la red.

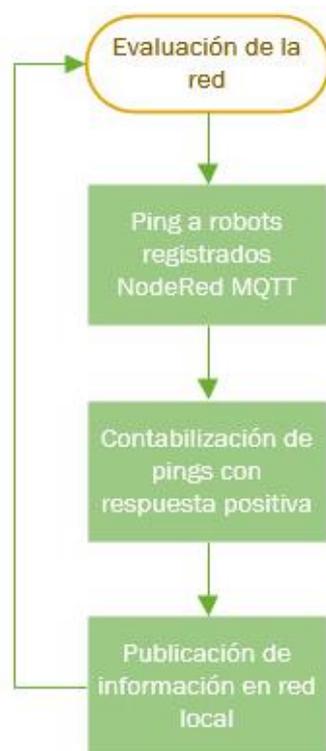


Figura 64 Flujograma de evaluación de red

Otro proceso que se realiza internamente en cada robot es el que se ilustra en la Figura 65 donde se decide la acción que cada uno debe realizar para colaborar con otros robots, esto quiere decir que la acción que el robot realiza es una parte de la acción en conjunto.

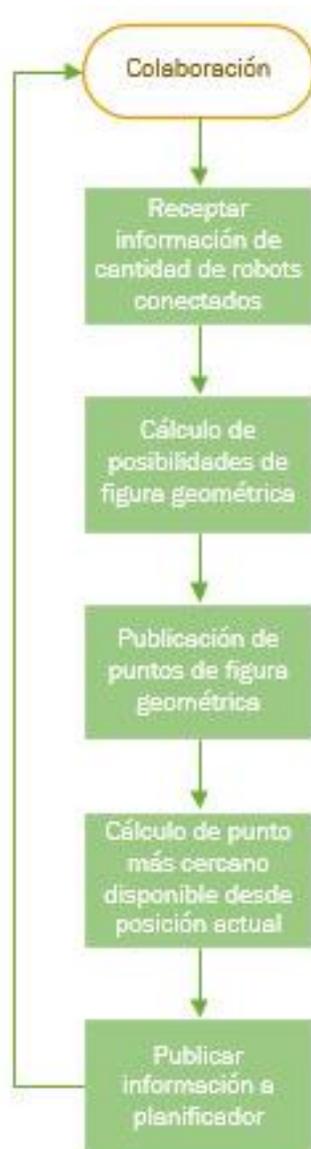


Figura 65 Flujograma de colaboración

De igual manera en la Figura 66 se tiene la planificación del movimiento, este flujograma ilustra la manera en como el robot móvil va a realizar la acción que se decidió en el flujograma anterior.

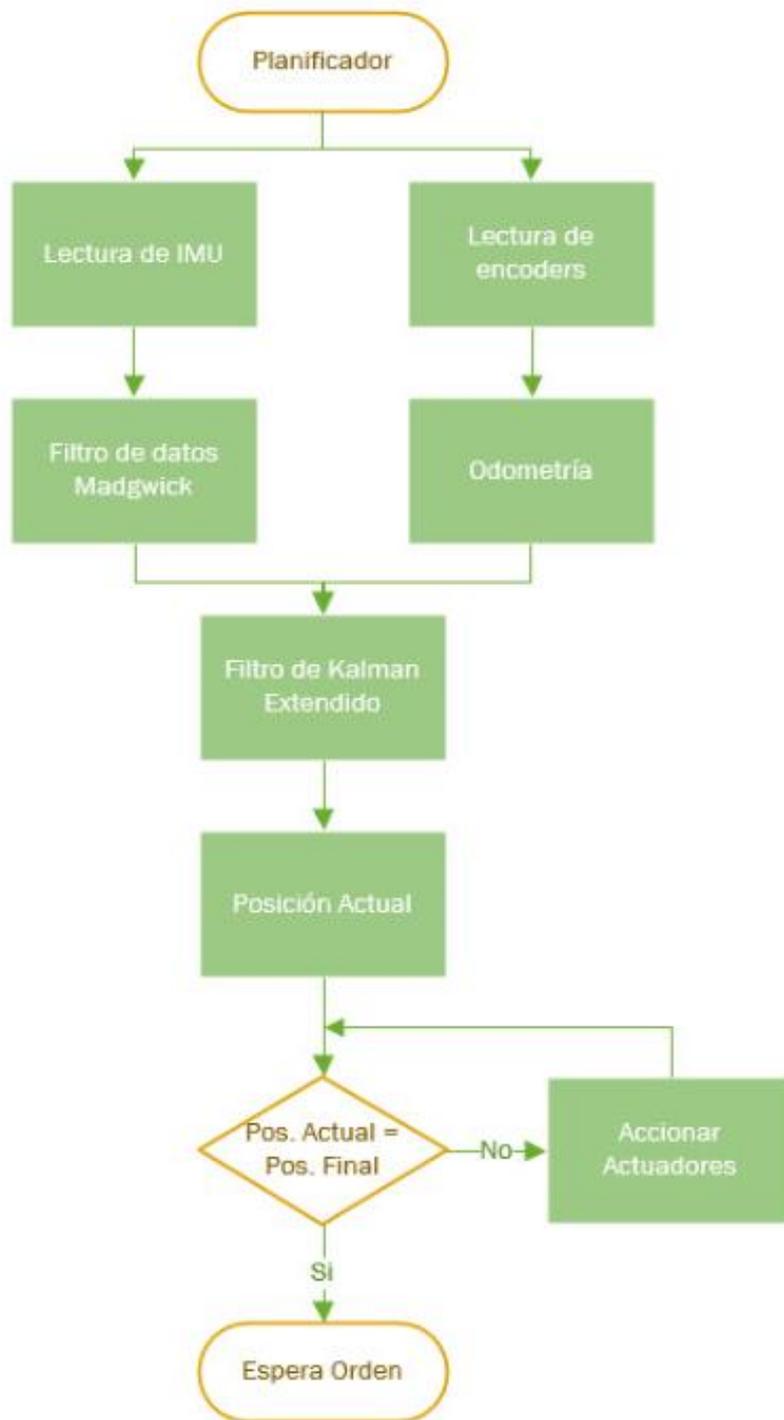


Figura 66 Flujograma de planificación de movimiento

3.6.4. Flujogramas de funcionamiento global

En la Figura 67 se muestra el proceso integrado de todos los flujogramas que se mostraron anteriormente. Cada robot recibe una orden y realiza todos los procesos mencionados

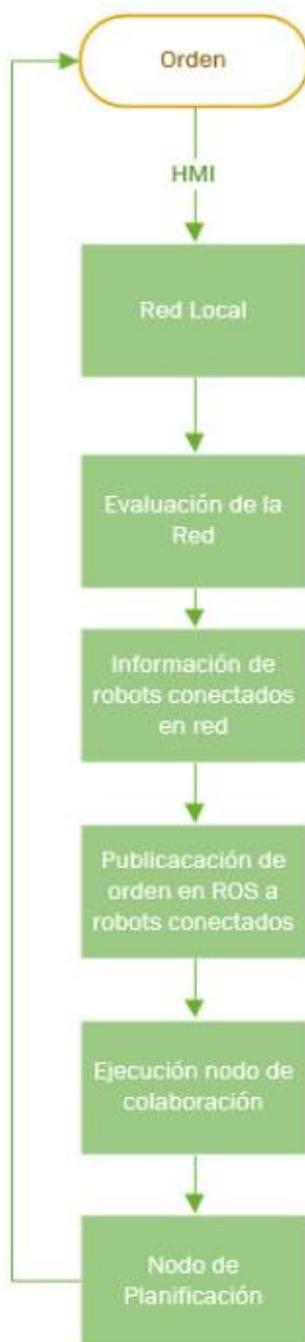


Figura 67 Flujograma de procesos

Los flujogramas presentados en esta sección tienen como objetivo la explicación de los algoritmos implementados para el funcionamiento de la plataforma robótica, como respaldo sus códigos base se encuentran en la sección Anexos literal C.

3.7. Integración de Subsistemas

○ Sistema Operativo

El sistema operativo es el interfaz humano máquina que va a presentar la Raspberry, este sistema operativo debe ser de licencia abierta y una de las ventajas de este miniordenador es que trabaja muy bien con SO de Linux. Linux ofrece una variedad de sistemas operativos en la Tabla 26 se presentan tres sistemas diferentes con sus respectivas características.

Tabla 26
Tabla comparativa de sistemas Operativos

	Lubuntu	Xubuntu	Ubuntu MATE
Minimum SDHC card	4GB	4GB	6GB
Snap Package Compatible	No	No	No
Desktop Environment	LXDE	XFCE	MATE
Raspberry Pi 3 Wifi Support	Yes	Yes	Yes
Raspberry Pi 3 Bluetooth Support	Yes	Yes	Yes
Support	Community	Community	Community
First Boot Wizard	Yes	Yes	Yes
Raspberry Pi Python Stack	Yes	Yes	Yes
omxplayer	Yes	Yes	Yes
Python IDLE	No !	No !	Yes
YouTube-DL	No !	No !	Yes
Minecraft Pi Edition	No !	No !	Yes
Scratch	No !	No !	Yes
Sonic Pi	No !	No !	Yes

Fuente: (Ubuntu Wiki, 2018)

Lubuntu es una variante más rápida, más liviana y de ahorro de energía de Ubuntu que utiliza LXDE. Está dirigido a usuarios "normales" de PC y portátiles que se ejecutan en hardware de baja especificación. Xubuntu es un sistema operativo elegante y fácil de usar, tiene incluido Xfce, que es un entorno de escritorio estable, ligero y configurable. Ubuntu MATE brinda simplicidad y elegancia al sistema operativo Ubuntu a través de un entorno de escritorio intuitivo y clásico. MATE es la continuación del entorno de escritorio GNOME 2, que se usó como escritorio predeterminado de Ubuntu hasta 10.10. (Ubuntu Wiki, 2018)

Por optimización de recursos se decide utilizar el sistema operativo más liviano, en este caso Lubuntu es el SO que las Raspberry van a tener, en él se instalaran los diferentes programas necesarios para la realización del proyecto.

- ROS



Figura 68 Logo de Robot Operating System

ROS es una plataforma de código abierto la cual nos permite administrar las funciones tanto de software como hardware, para operación, control y monitoreo de diferentes tipos de robots. ROS tiene una arquitectura de tópicos y nodos que permiten una estructuración ordenada de plataformas robóticas junto con la reutilización de códigos y aplicaciones. (AmandaDattalo, 2018)

- LinoRobot

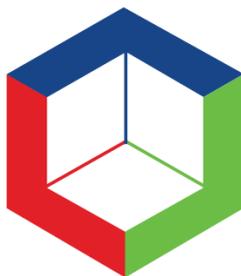


Figura 69 Logo de Linorobot

Linorobot es una plataforma para robots móviles para diferentes configuraciones de código abierto y bajo costo, es compatible con ROS para la realización de diferentes aplicaciones. Linorobot es flexible y permite el uso de diferentes placas de desarrollo para la funcionalidad del robot móvil tanto en el software y el hardware. (Jimeno, 2017)

- PlatformIO IDE



Figura 70 Logo de PlatformIO IDE

Es un ecosistema de código abierto para el desarrollo de IoT sin necesidad de dependencias internas para el software operativo, con código abierto que permite el uso de 500 tarjetas, 25 plataformas de desarrollo entre otros servicios. Permite diferentes lenguajes de programación y el uso de ambientes para la estructuración de programas. (PlatformIO , 2018)

- NodeRED

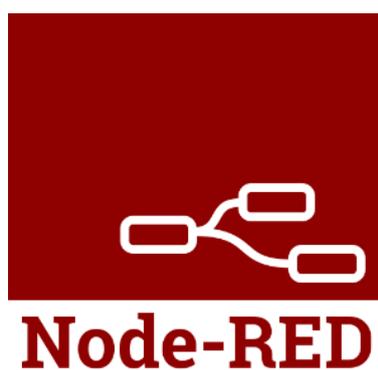


Figura 71 Logo Node-RED

Es una herramienta la cual permite la integración del protocolo MQTT con una interfaz amigable para el usuario. Permite el desarrollo de aplicaciones y flujos de trabajo mediante el uso de tópicos y nodos para la comunicación global del desarrollo de aplicaciones. (JS Foundation., 2018)

Esquema de integración



Figura 72 Esquema de integración de subsistemas por su tipo

En Figura 72 nos muestra una agrupación horizontal de acuerdo al tipo de programa utilizado para la plataforma. Tenemos los sistemas de integración que permiten la administración de los recursos y la comunicación de los mismos dentro de la plataforma. Los sistemas operativos nos permiten la instalación y el funcionamiento de los sistemas de integración. Finalmente, las placas de desarrollos son los elementos físicos sobre los cuales se realiza el almacenamiento y funcionamiento tanto de los sistemas operativos como del software de integración.

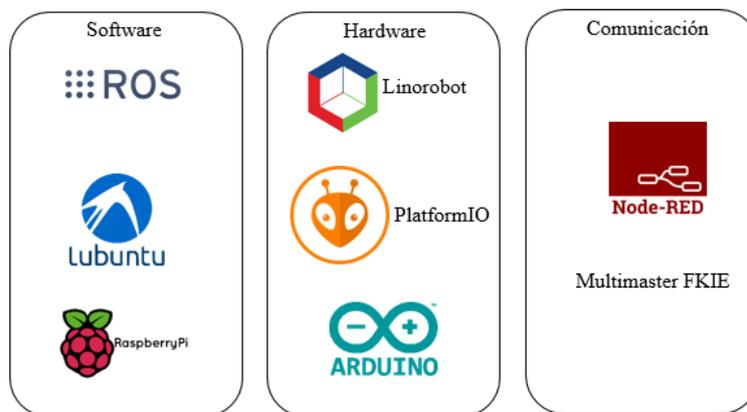


Figura 73 Esquema de integración de subsistemas por su utilidad

Figura 73 agrupa los programas utilizados para la parte de software, hardware y comunicación de una manera vertical de acuerdo a utilidad. En software ROS nos permite controlar los recursos que dispone la placa de desarrollo Raspberry Pi con su respectivo sistema operativo Ubuntu, también establece la comunicación con la plataforma Linorobot para el control de los elementos mecánicos de los robots móviles.

En hardware se encuentran los programas que nos permiten el control de los elementos mecánicos, este control se realiza por medio de la tarjeta Arduino con sus características de entradas y salidas de señales, se la programa por medio de PlatformIO sin la necesidad de dependencias externas, permitiendo la administración de los recursos con la plataforma Linorobot.

En comunicación usamos multimaster FKIE para poder establecer una red local entre los robots móviles que cuenten con ROS, esto facilita la transferencia de datos entre nodos y tópicos, de igual manera Node Red nos facilita la implementación de una interfaz por medio del protocolo MQTT para el control por parte del usuario de la plataforma colaborativa.

Por lo tanto, de acuerdo a las Figura 72 y Figura 73 podemos apreciar una integración de sistemas en un eje tanto horizontal en el tipo de elemento utilizado y un eje vertical de acuerdo a la funcionalidad que se desarrolla la plataforma.

CÁPITULO IV

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1. Construcción e Implementación

4.1.1. Hardware

Luego de realizar el diseño de todas las partes del robot se procede a su construcción, se enlistan en la Tabla 27 los materiales utilizados y su proceso de fabricación de los elementos construidos por los integrantes del proyecto. Todas las especificaciones de construcción se pueden encontrar en la sección Anexos.

Tabla 27
Elementos fabricados en el proyecto

Parte	Material	Técnica
Base	Acrílico	Corte Laser
Placa Electrónica	Fibra de vidrio	Grabado con ácido férrico
Case batería 1	PLA	Impresión 3D
Case batería 2	PLA	Impresión 3D
Case IMU	PLA	Impresión 3D
Seguros del motor	PLA	Impresión 3D
Acople de ruedas	PLA	Impresión 3D y maquinado
Carcasa del robot	PLA	Impresión 3D

En la Figura 74 se compara el diseño con el resultado final teniendo similitudes y validando el diseño realizado, el robot móvil se replica tres veces para lograr realizar la plataforma de robótica colaborativa. En la Tabla 28 se detallan los precios de cada elemento utilizado.

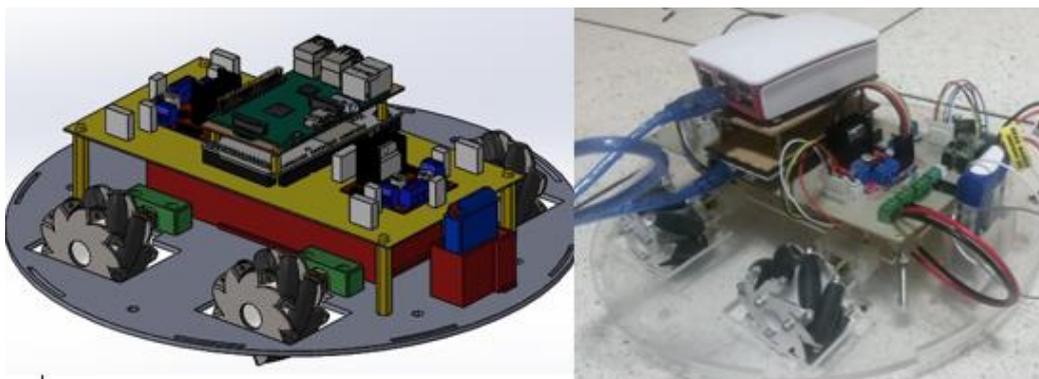


Figura 74 Comparación diseño y producto final

Tabla 28
Tabla de costos

Cantidad	Elemento	Precio Total
4	Ruedas omnidireccionales Mecanum 60 mm	\$102
4	Micro-motores con encoder incluid	\$ 88
1	Arduino DUE	\$ 30
1	Raspberry pi3 B+	\$ 80
2	Puente H L298	\$ 10
1	PCB	\$ 9
varios	Elementos electrónicos	\$ 12
1	Batería 3000mAh	\$ 12
1	Batería LIPO 1000mAh	\$ 21
1	Sensor IMU	\$ 22
1	Base de acrílico	\$ 15
1	Carcasa de acrílico	\$ 34
	Resultado	\$ 435

Nota: Los precios fueron realizados para un solo robot, los costos de las horas máquina y horas hombre no fueron considerados.

En una comparación de precios se encontraron en el mercado robots omnidireccionales desde \$ 550 a \$750 con diferentes características pero sin conectividad a la nube en ninguna de ellas. (RobotShop, 2018)

Finalmente luego de la implementación y conexión de todos los elementos se tiene un producto final con las especificaciones mostradas en la Tabla 29.

Tabla 29

Especificaciones técnicas

Especificaciones Técnicas del Robot	
Medidas	30 x 17 [cm]
Peso	2.14 Kg [cm]
Capacidad de carga	1.2 Kg [cm]
Autonomía energética	65 minutos

4.1.2. Software

Para la puesta en marcha de la plataforma robótica se instalan los programas en la jerarquía mostrada en la Figura 75.

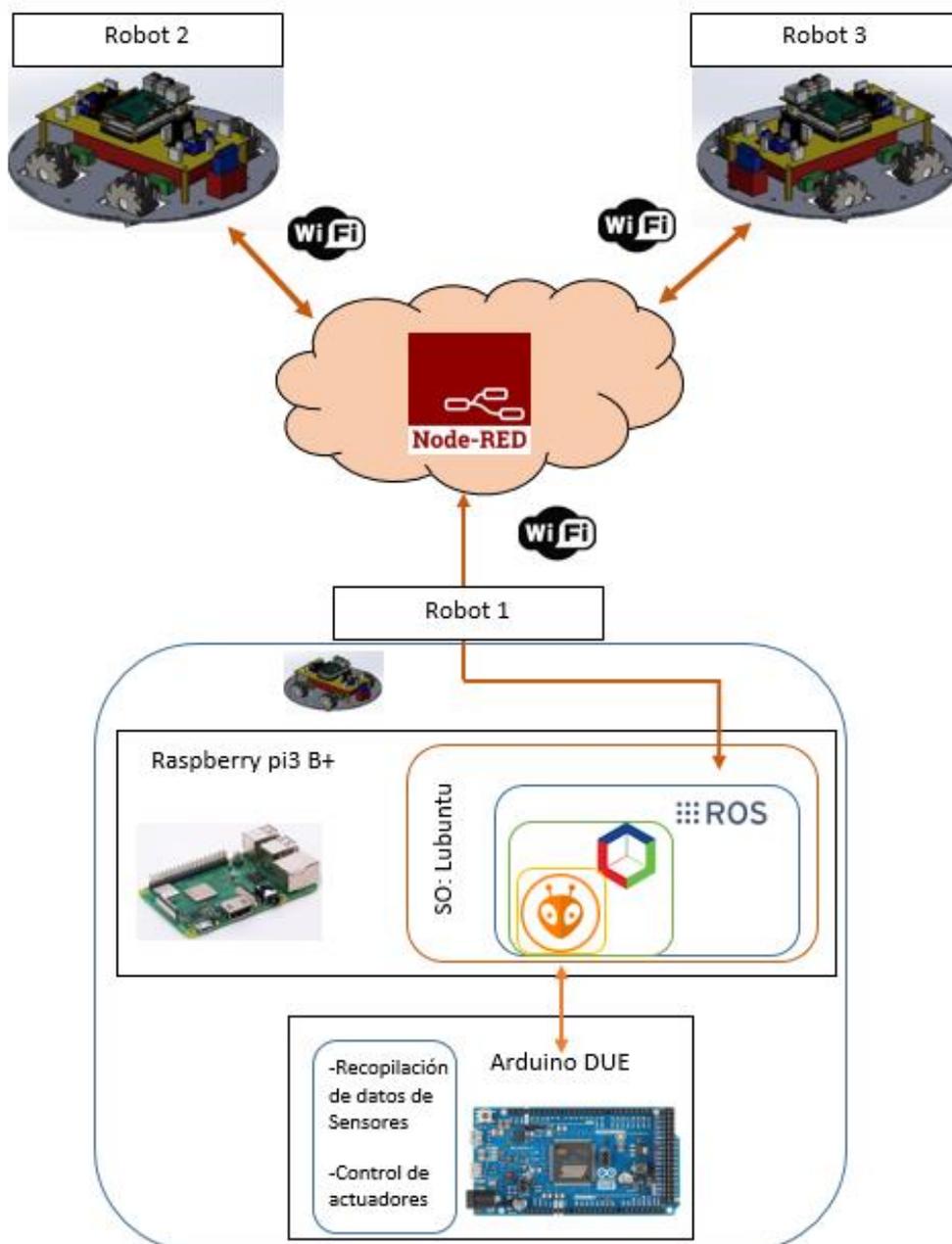


Figura 75 Esquema de software utilizado

Los robots 2 y 3 son una réplica del robot 1 por lo que el esquema de software es el mismo. Se pueden evidenciar como la herramienta de Node-Red da la posibilidad de conectividad a todos los dispositivos que tienen ejecutándose el conjunto de librerías ROS en su sistema operativo. Finalmente LinoRobot es la herramienta que mediante PlatformIO escribe y controla el algoritmo en la tarjeta de adquisición para la gestión de datos del robot.

4.2. Pruebas de Funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento que se realizan son basadas en trabajos anteriores, donde se tabulan 5 pruebas realizando una combinación de trayectorias rectilíneas, la prueba principal para un robot omnidireccional es mostrada en la Figura 76 donde el robot debe realizar una trayectoria cuadrada.

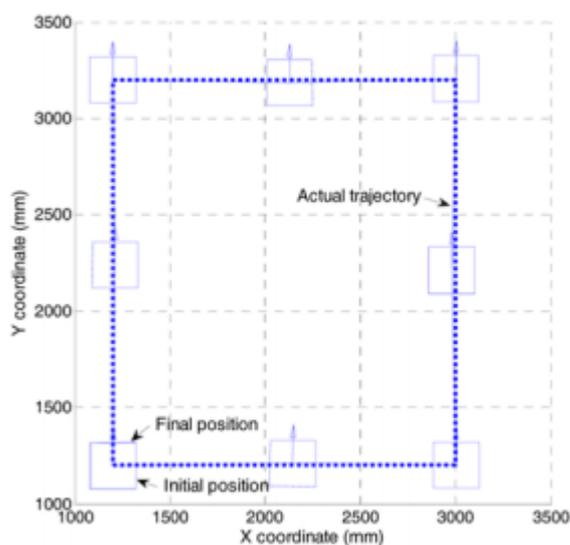


Figura 76 Trayectoria recomendada para pruebas

4.2.1. Localización y Navegación

La prueba de localización y navegación se refieren a como el robot móvil realiza trayectorias específicas y la capacidad de seguimiento por software que se tiene en el proyecto, al ser un robot omnidireccional se puede mover a cualquier dirección paramétrica desde un mismo punto y con una misma orientación. Es decir el robot móvil puede moverse en las direcciones mostradas en la Figura 77, de estas direcciones escogeremos tres principales para realizar pruebas de su funcionalidad. Se escogen las flechas verdes que representan el movimiento en línea horizontal, vertical y diagonal, las otras direcciones son iguales pero con diferente sentido por lo que se asumen resultados similares.

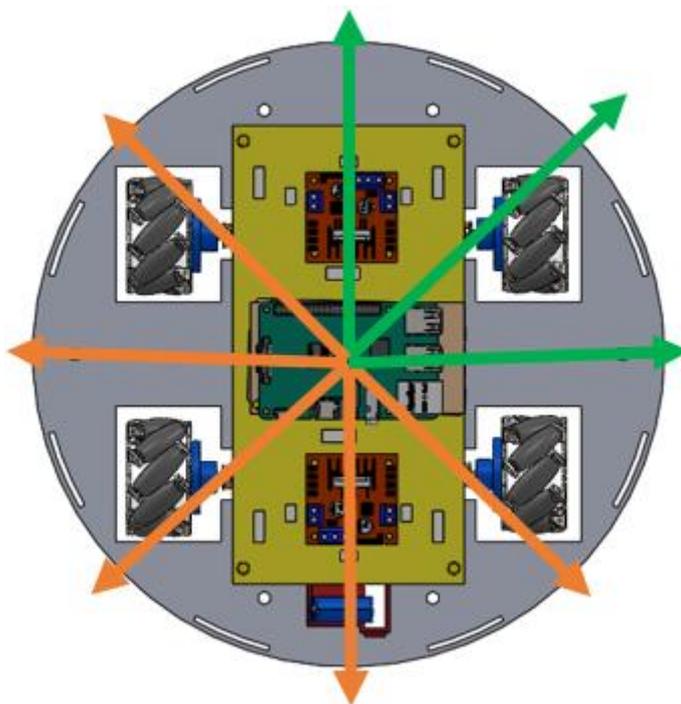


Figura 77 Direcciones para pruebas de movimiento

- **Línea vertical**

La distancia a recorrer en dirección vertical va a ser de 200 centímetros, se construye una línea de referencia en el suelo. En la Figura 78 se puede observar la prueba realizada. La línea roja muestra la trayectoria recorrida por el robot, a simple vista no existe un error considerable.

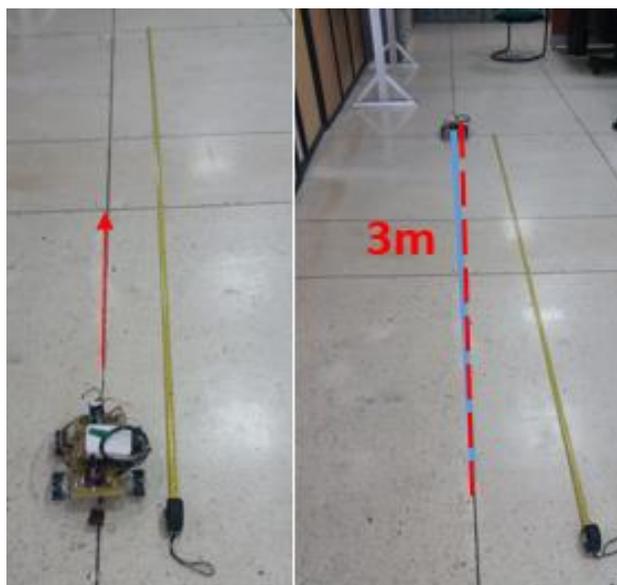


Figura 78 Prueba en línea vertical

Con el promedio de los datos obtenidos en el programa Rviz y de una medición manual, como se verifica en la Figura 79, se obtiene el error en la

Tabla 30. El proceso se repite 5 veces y se realiza un promedio para estimar un error real del robot.

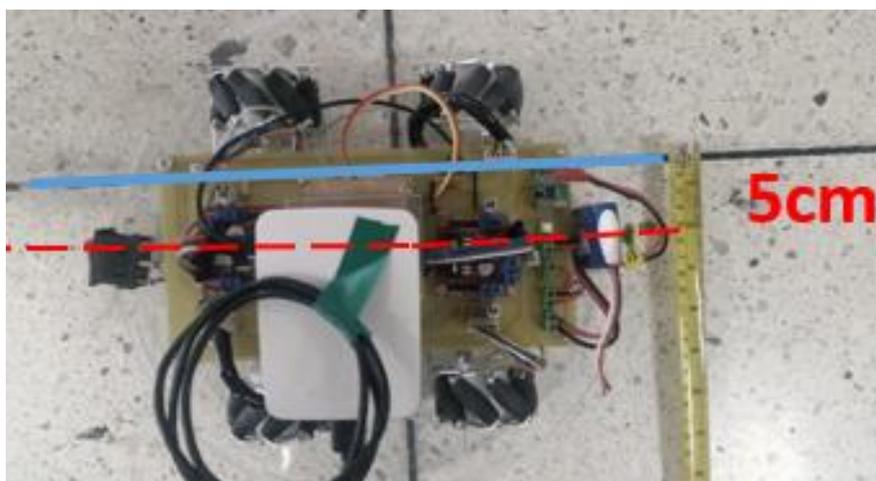


Figura 79 Distancia de desfase con la trayectoria

Tabla 30

Error en línea vertical

N°	Dist. Rviz	Dist. Manual	Promedio Dist.	Referencia	Error %
1	4	5	4.5	300	1.5%
2	3	3	3	300	1%
3	2	2	2	300	0.67%
4	2	3	2.5	300	0.83%
5	4	4	4	300	1.33%
Error Final					1.07%

El error se obtiene calculando el porcentaje de desfase con respecto a la distancia total recorrida, por lo que hay que considerar que el error es acumulativo para distancias más grandes.

- **Línea horizontal**

La distancia a recorrer en dirección horizontal va a ser de 200 centímetros, se construye una línea de referencia en el suelo para realizar la trayectoria mostrada en la Figura 80.

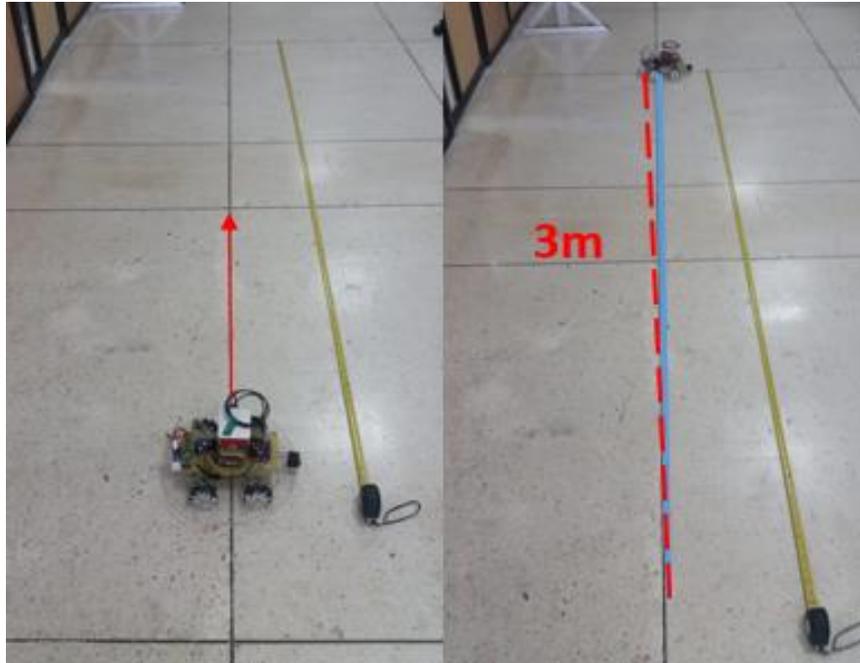


Figura 80 Recorrido horizontal del robot

Se realiza de igual manera una medición manual como se muestra en la Figura 81 y se registra mediante software, como se evidencia en la Figura 82, otra distancia para realizar un promedio de error.

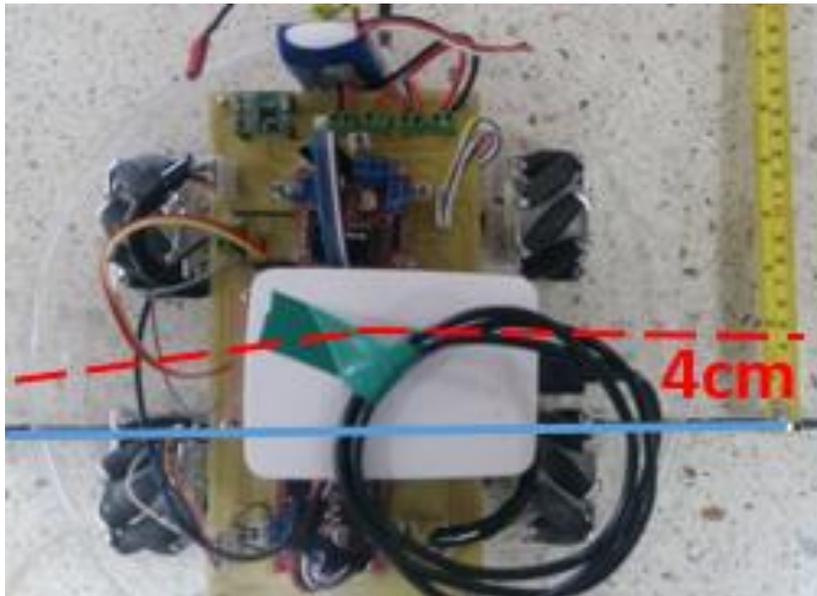


Figura 81 Medición del error en trayectoria horizontal

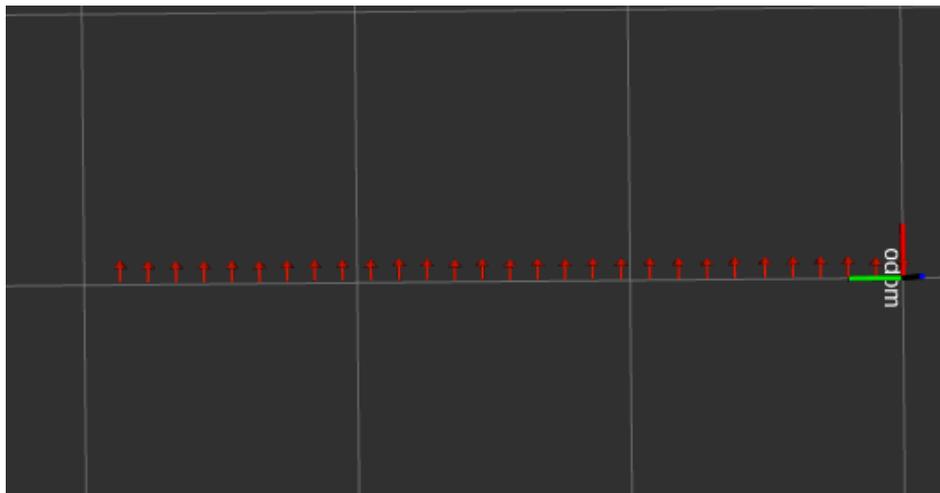


Figura 82 Resultado obtenido en Rviz, trayectoria horizontal

Finalmente se registra en la los resultados obtenidos, se promedia las distancias medidas manualmente y por software, y finalmente se realiza un cálculo de error porcentual con respecto a la distancia total recorrida.

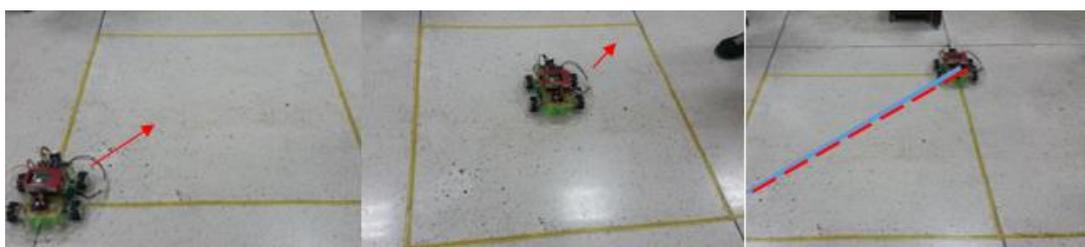
Tabla 31*Error en línea horizontal*

N°	Dist. Rviz	Dist. Manual	Promedio Dist.	Referencia	Error %
1	4	4	4	300	1.33%
2	4	5	4.5	300	1.5%
3	2	4.5	4.25	300	1.42%
4	3	4.4	3.7	300	1.23%
5	2	3	2.5	300	0.83%
Error Final					1.26%

El error promedio calculado es del 1.26% en trayectorias horizontales, siendo este menor al que se produce en movimientos verticales.

- **Línea diagonal**

La distancia a recorrer en dirección diagonal (45°) va a ser de 145 centímetros, se construye una línea de referencia en el suelo para que el robot realice la trayectoria que se muestra en la Figura 83. Con el promedio de los datos obtenidos del programa Rviz y de una medición manual se obtiene el error en la Tabla 32.

**Figura 83** Recorrido horizontal del robot**Tabla 32***Error en línea diagonal*

N°	Dist. Rviz	Dist. Manual	Promedio Dist.	Referencia	Error %
1	2	5	3.5	145	2.41%
2	1	3	2	145	1.38%
3	2	4	3	145	2.07%

CONTINÚA →

4	4	7	5.5	145	3.79%
5	3	4	3.5	145	2.41%
Error Final					2.41%

- **Trazo de una figura**

Para complementar las pruebas de navegación se realiza una figura cuadrada donde existen las combinaciones básicas de movimiento, la trayectoria a seguir se muestra en la Figura 84 donde el robot se encuentra en el punto P0. El robot realiza un movimiento anti horario cubriendo los puntos (P1, P2, P3, P4) como se muestra en la Figura 85, el objetivo final es volver al punto inicial y el error se mide con la diferencia entre P4 y P1. Los datos se respaldan con los datos obtenidos en software que se muestra en la Figura 86.

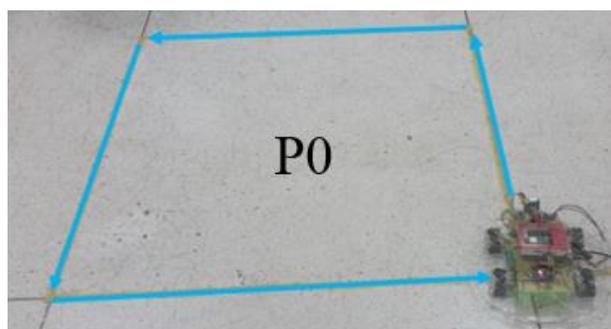


Figura 84 Trayectoria con forma cuadrada del robot móvil

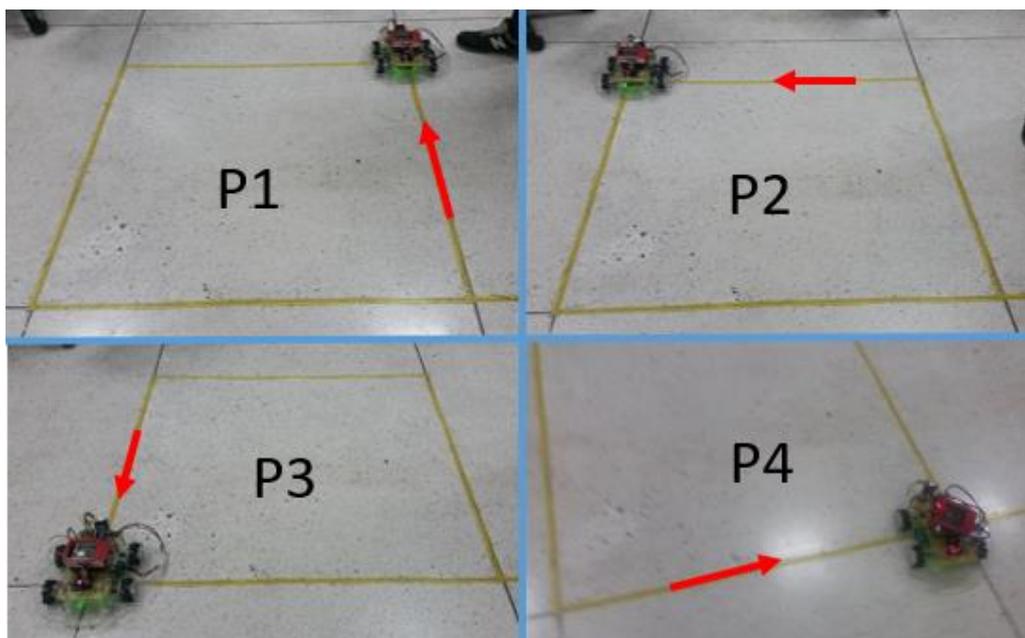


Figura 85 Puntos críticos del recorrido cuadrado

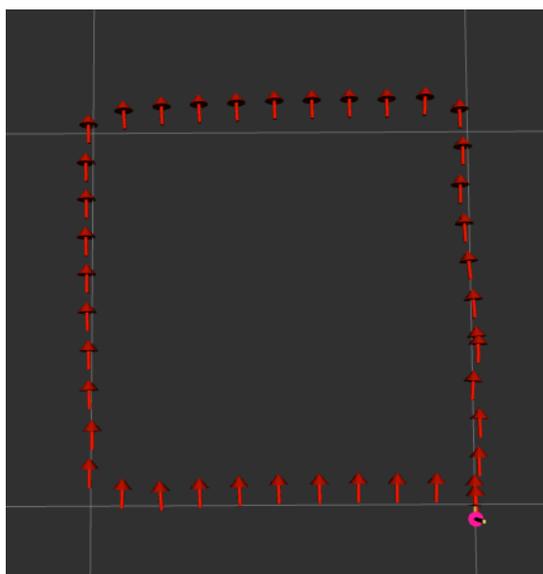


Figura 86 Resultado obtenido en Rviz, figura cuadrada

En la

Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos en esta prueba donde el error es medido con la distancia entre el punto P0 y P4 que en circunstancias ideales deberían tener las mismas coordenadas, la referencia del error se considera la distancia total recorrida que es 400 cm.

Tabla 33*Error en realizar una figura*

N°	Dist. Rviz	Dist. Manual	Promedio Dist.	Referencia	Error %
1	5	7	6	400	1.5%
2	4	4	4	400	1%
3	7	9	8	400	2%
4	2	4	3	400	0.75%
5	5	6	5.5	400	1.38%
Error Final					1.38%

El resultado de las pruebas realizadas en la trayectoria cuadrada de un metro de lado se tiene un error del 1.38%.

4.2.2. Maniobrabilidad

La maniobrabilidad es una percepción de facilidad de movimiento, en el caso de la robótica móvil esta facilidad se puede medir con diferentes aspectos como:

- La evasión de obstáculos
- La velocidad para realizar trayectorias
- La menor cantidad de acciones para completar un trabajo.

Para la plataforma implementada solo se compara la cantidad de operaciones realizadas para completar una figura cuadrada entre el robot omnidireccional y un robot diferencial de trabajos de titulación diferentes como el de la Figura 87.

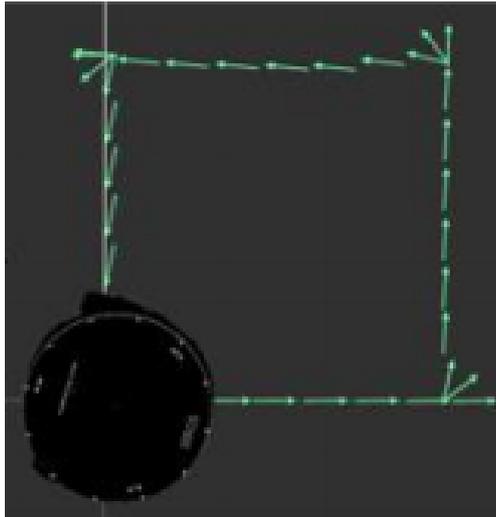


Figura 87 Robot Simba

Para que el robot móvil diferencial realice un cuadrado debe girar en su propio eje en cada vértice. Este giro es un proceso que se ilustra en la Figura 88, en la Figura 89 se muestra el proceso que sigue el robot omnidireccional para realizar el mismo proceso.

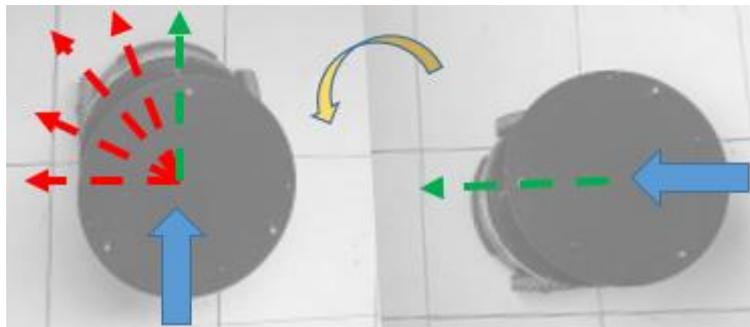


Figura 88 Giro en su propio eje del robot diferencial

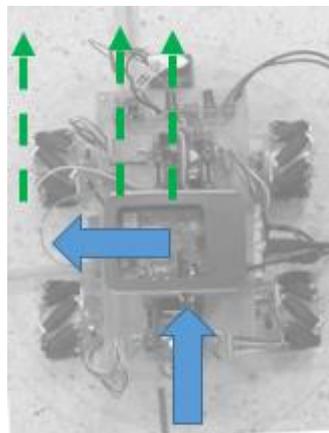


Figura 89 Cambio entre movimiento vertical y horizontal

El robot omnidireccional no debe cambiar ejes para realizar movimientos rectilíneos solo la dirección de sus ruedas. En un análisis se concluye que en cambios de orientación en movimiento rectilíneos el robot omnidireccional necesita menos acciones por lo que brinda mayor maniobrabilidad. Esto se puede verificar en la comparación de la Figura 90 y se afirma que el robot omnidireccional tiene menos restricciones dinámicas que un robot diferencial.

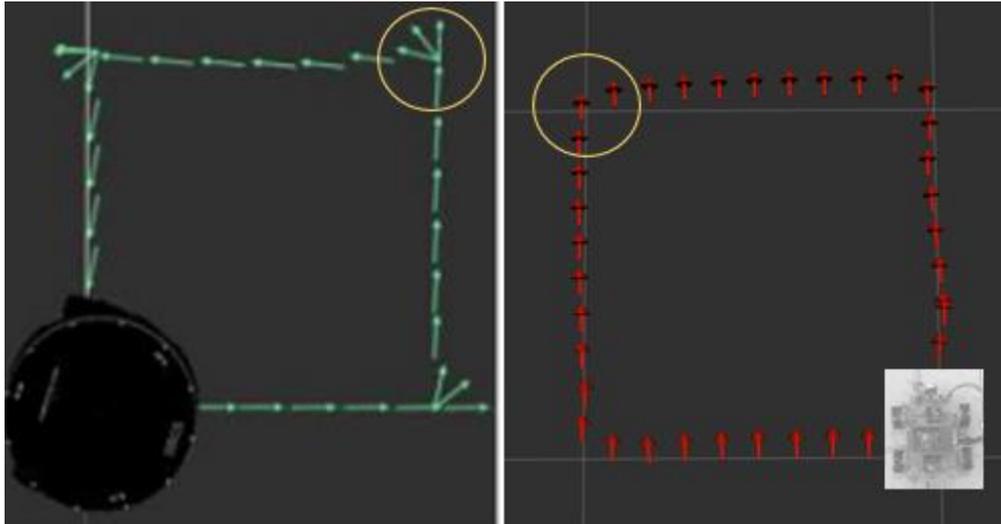


Figura 90 Comparación robot diferencial/omnidireccional

4.2.3. Comunicación de red

La red de comunicación que se implementó se presenta en la Figura 91 donde se puede apreciar una descentralización de procesos en la red de comunicación, un ordenador realiza una publicación de información, en el cual cada robot lee esta información independientemente y decide que acción realizar.

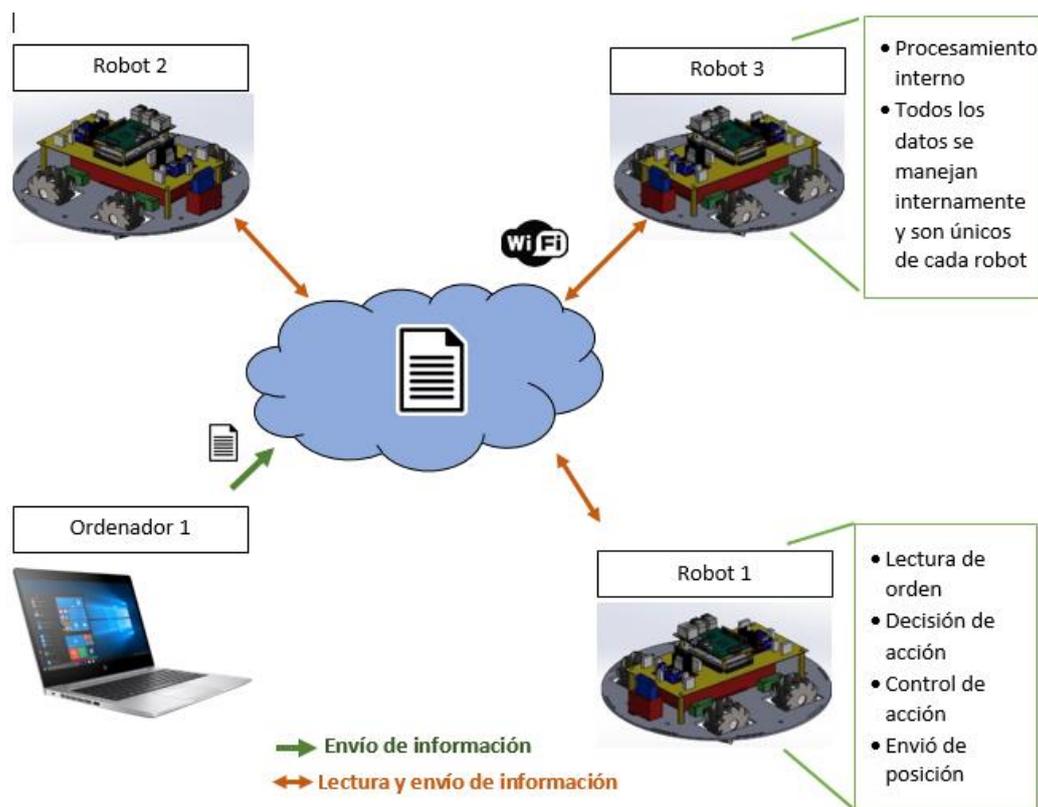


Figura 91 Red de comunicación

Se considera una red descentralizada partiendo desde el concepto de procesamiento y toma de decisiones, cada robot realiza estos procesos sin depender de otro robot ni del ordenador principal. Los datos están publicados en la nube y además en la red se puede permitir la adición de otros elementos como más robots o diferentes dispositivos que publiquen órdenes. Gracias a estos elementos se considera que la red tiene características de IoT haciendo del proyecto una red escalable.

4.2.4. Trabajo colaborativo

Para la prueba de trabajo colaborativo se ha diseñado el espacio mostrado en la Figura 92 que consta de un cuadrado de 200 centímetros, en sus cuatro vértices tiene cuadrados de 35 centímetros y en su centro un círculo 50 centímetros de radio.

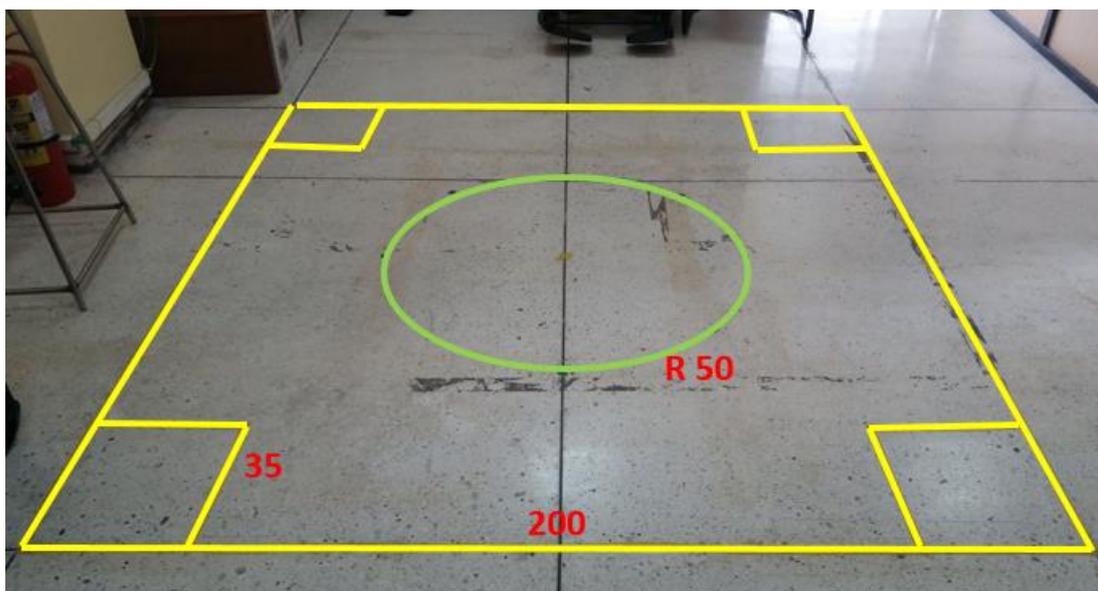


Figura 92 Espacio de pruebas para trabajo colaborativo

Para iniciar con la prueba se colocan los robots en los cuadrados de las esquinas, hay espacio para cuatro robots (un robot puede ser simulado). Posterior se publica puntos diferentes en la red. Como se puede observar en la Figura 93 cada robot leerá esta información y se dirigirá al punto más cercano. La trayectoria es independiente, lo importante es el resultado que se muestra en la Figura 94 donde cada robot cubre un punto.

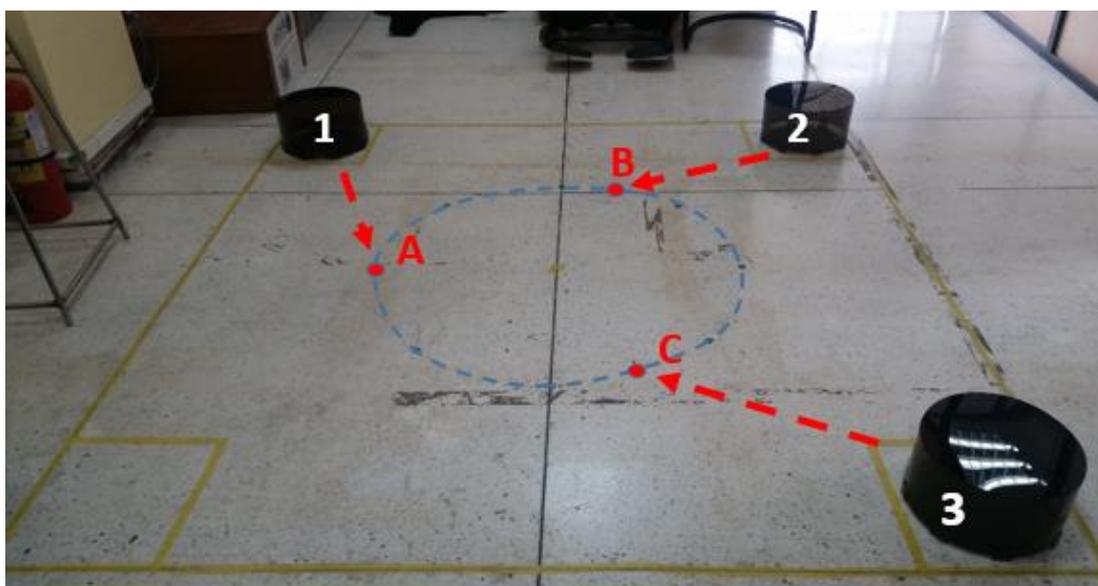


Figura 93 Inicio de la prueba

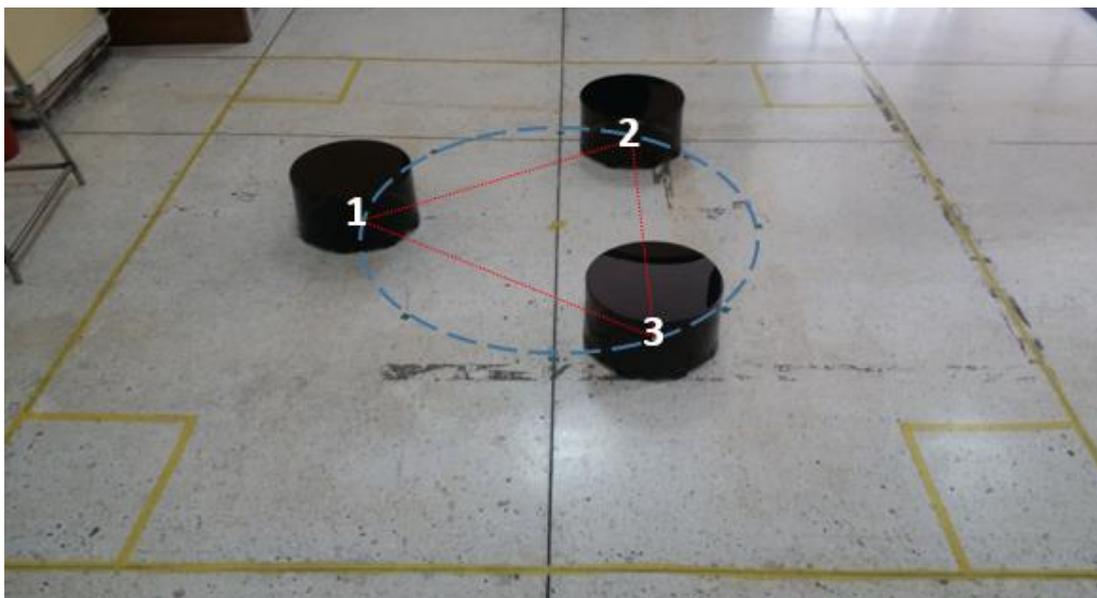


Figura 94 Robots en los puntos indicados

Nótese que los robots forman un triángulo inscrito en el círculo de trabajo, si se simularan 4 robots harían un cuadrado, 5 un pentágono y así sucesivamente hasta que el perímetro del círculo lo permita. En la Figura 95 se retira el robot 3, por lo que el robot 2 debe moverse para realizar una línea axial en la circunferencia el resultado final se muestra en la Figura 96.

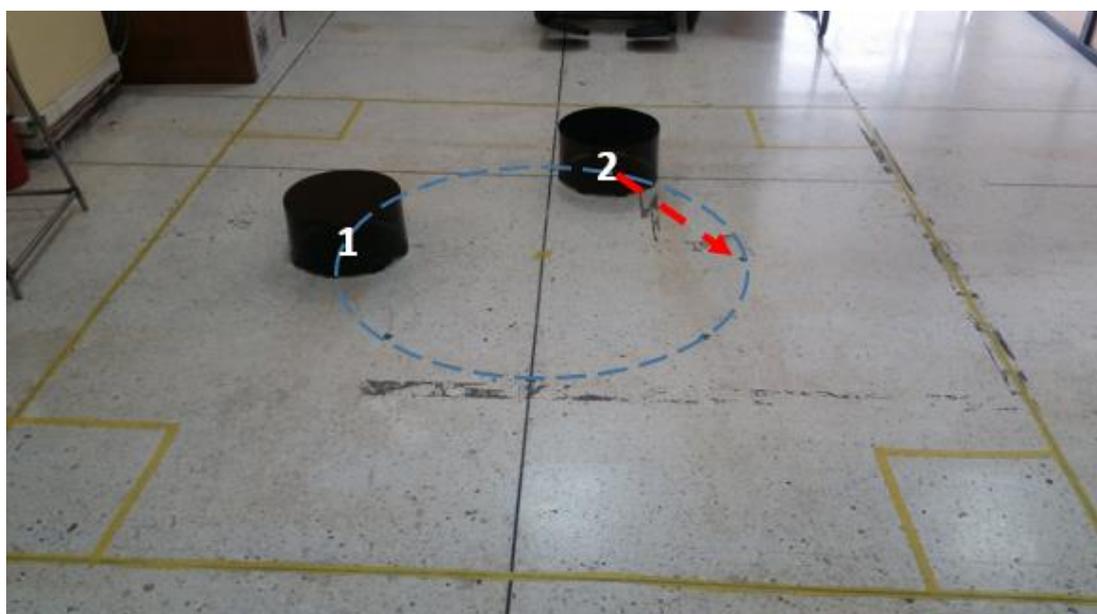


Figura 95 Segunda prueba de robótica colaborativa

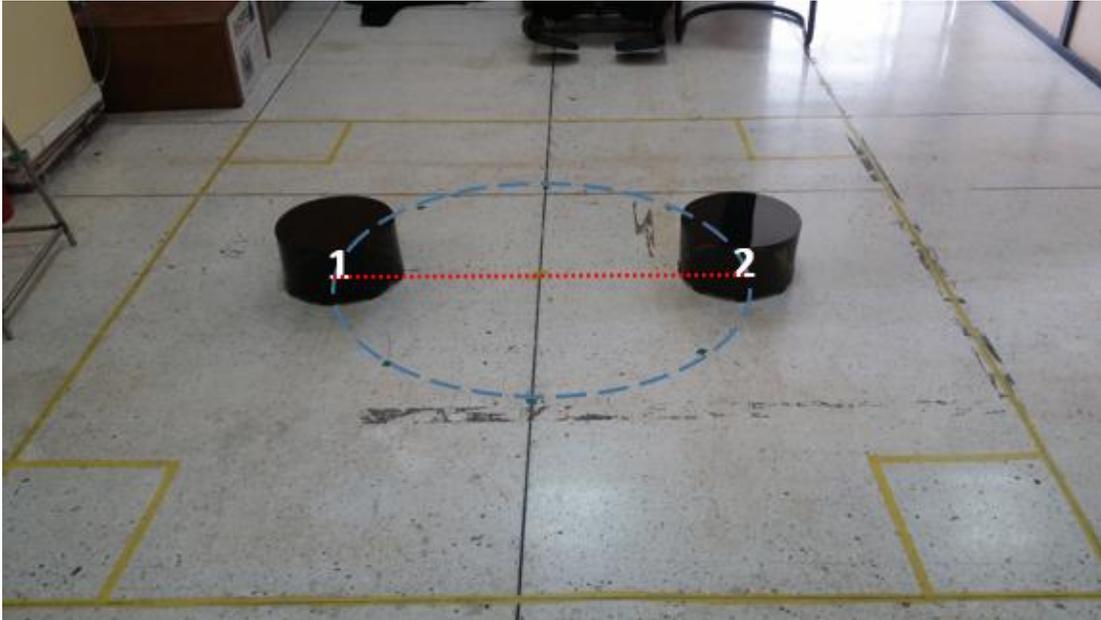


Figura 96 Resultado de la segunda prueba

Con estas pruebas realizadas se valida el trabajo colaborativo entre robots de la red inalámbrica diseñada. Estos procesos se plantean como base de trabajos futuros donde se puede mejorar la programación de cada robot y escalar su aplicación.

4.3. Análisis de Resultados

La construcción e implementación de la plataforma robótica tienen los resultados esperados.

- El diseño mecánico es similar al producto final, los robots cumplen con la característica de escalabilidad al ser modular, contar con espacio para añadir en otros elementos de ser necesarios en futuros trabajos o diferentes aplicaciones.
- El diseño electrónico es satisfactorio todos los elementos son energizados y funcionan correctamente para la aplicaciones del proyecto. De igual manera la característica principal que cumple es la escalabilidad permitiendo conectar en sus puertos disponibles otros elementos. También aportan flexibilidad al permitir modificar la programación nativa de las tarjetas electrónicas según la aplicación que se requiera.

Las pruebas de navegación realizadas en los robots dan resultados aceptables para el proyecto, estos resultados dejan las siguientes conclusiones.

- El error depende de la distancia recorrida, si se recorre una distancia muy grande el error puede ser considerable por lo que es mejor dividir este trayecto en distancias más pequeñas.
- El error en trayectorias verticales presenta un error mayor, esto puede deberse a la sensibilidad de la IMU, en pruebas anteriores se demostró que los errores disminuyeron al hacer menos sensible al sensor. Otra posibilidad es mejorar el controlador ON/OFF o cambiar el tipo de controlador que se utiliza para la corrección del ángulo de orientación.

Las pruebas realizadas en maniobrabilidad arrojan conclusiones muy favorables para los requerimientos del proyecto.

- Al tener menor restricciones dinámicas la maniobrabilidad es alta en los robots omnidireccionales, esto brinda mayor facilidad para esquivar obstáculos y menor tiempo en realizar tareas.
- El robot omnidireccional es óptimo para realizar movimientos rectilíneos, en caso de necesitar trayectorias curvas se recomienda utilizar otro tipo de configuración.

La configuración de red que se realizó da características específicas al flujo de información y a la realización de procesos como se especifica a continuación.

- La red posee conectividad a la nube, utilizando servidores globales se crea una estructura descentralizada y con características IoT.
- Cada robot tiene la capacidad de leer información colgada en la red, y con esa información se realizan diferentes procesos propios de cada robot como procesamiento y recolección de datos.

Las pruebas de trabajo colaborativo fueron realizadas con éxito y se tienen las siguientes conclusiones

- Los robots pueden distinguir la menor distancia a recorrer de una serie de puntos optimizando así su trayectoria. Recalcar que las pruebas fueron controladas para que no exista un punto con la misma distancia menor a dos robots.
- Los robots reconocen la distancia a la que deben estar dependiendo de la cantidad de robots que existen en la red colaborativa.

5.1. Conclusiones

- Se diseñaron e implementaron tres robots móviles conectados en una red descentralizada que realizan un trabajo colaborativo. Los elementos permiten realizar fácilmente cambios o adaptaciones haciendo escalable esta plataforma, su estructura y forma permite la adición o el cambio de diferentes elementos brindando escalabilidad al proyecto.
- Se diseñó e implementó una red inalámbrica que utiliza protocolo MQTT en servidores globales con aplicaciones IoT permitiendo la accesibilidad desde cualquier punto con acceso a Internet, dando la posibilidad de conectar otros dispositivos que cuenten con conectividad a la nube.
- Los robots cuentan con ruedas omnidireccionales en configuración Skid Steer que brinda alta maniobrabilidad en comparación con otras plataformas robóticas. Tienen una forma circular con un radio de 30 centímetros y una altura desde el suelo de 16.5 centímetros. Cada robot tiene un error aproximado del 1.6% en distancias menores de 3 metros, el error es acumulativo.

- Los robots tienen autonomía en sus procesos, poseen la capacidad de leer información de la red, decidir qué acciones realizar y gestionar sus procesos de acuerdo a su necesidad.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar el cambio de los parámetros del controlador de velocidad, en caso de que fuese necesario, si la plataforma robótica es utilizada en otro suelo que no sea el del laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos.
- Cuando se utiliza el sensor de medida única inercial IMU se debe tener en cuenta la sensibilidad del mismo. En el proyecto la sensibilidad fue disminuida debido a que pequeñas vibraciones interferían con la correcta navegación del robot móvil. Estas características pueden ser cambiadas en la programación nativa del Arduino, que fue gestionada con LinoRobot.
- Tener muy en cuenta la configuración y la dirección de giro de las ruedas omnidireccionales para realizar los diferentes movimientos, dirigirse a la Figura 47 y
- Tabla 25 presentes en este documento.

5.3. Trabajos Futuros

Dadas las conclusiones y recomendaciones que el proyecto tuvo como resultados se sugieren a continuación diferentes trabajos para optimizar su funcionamiento, reforzar el conocimiento adquirido o desarrollar nuevos conocimientos.

- Realizar un tracking de los robots mucho más desarrollado. Con la mejora del controlador que corrige la orientación del robot, o la utilización de toda la información que brinda el sensor IMU se puede realizar el tracking del robot en espacios mucho más grandes o realizar tareas más específicas.

- Aumentar más dispositivos en la red, sean robots similares o con otras características para simular un ambiente o un proceso industrial.
- Mejorar la aplicación y características del trabajo colaborativo. Se propone utilizar el protocolo COAP que tiene más prestaciones para este servicio.
- Aumentar las características de los robots como velocidad, capacidad de carga, movilidad entre otras.
- Utilizar la red para aplicaciones de mapeo en conjunto, incluir un sensor LIDAR en cada robot y que realicen un mapeo en conjunto.
- Incluir la red creada para la plataforma de robótica colaborativa en una red IoT más grande para probar sus prestaciones de comunicación.

Bibliografía

- A. Newman, P. &. (1995). Opportunistic Scheduling for Robotic Machine Tending. 168-175.
- Adamides, G. (2013). *Agricultural Robot Sprayer and Evaluation of User Interfaces in Field Experiments*. Agricultural Research Institute.
- Alessandro Farinelli, L. I. (2004). *IEEE Transactions on System Man and Cybernetics*, 2015-2028.
- Altares, G. (2014, Septiembre 30). Algún día nos tragaremos un robot. *El País*.
- Alvarez, M. (2012, Marzo). *lajpe.org*. Retrieved from http://www.lajpe.org/mar12/25_LAJPE_611_Manuel_Alvarez_preprint_corr_f.pdf
- AmandaDattalo. (2018, 08 08). *ROS.ORG*. Retrieved from <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>
- Ana Cristina Palacios, A. M. (2011). Learning Concepts with Multi-robot Systems. *Springer*.
- Arduino. (2015). *Placas de desarrollo* . Retrieved from <https://www.arduino.cc/>
- Arkin, R. (1990). Integrating behavioral, perceptual and world knowledge in reactive navigation. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*.
- Arrue Ullés, B. c. (2016). *Análisis de algoritmos para localización y mapeado simultáneo de objetos*. Sevilla: Escuela técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Asama, H. (1994). *Operation of cooperative multiple robots using communication in a decentralised robotic system*. Switzerland: Proc. Conf. on From Perception to Action.
- Bailey, H. (2006). *SLAM and Navigation with Pioneer 3-AT*. Robotics Automation Magazine.
- Balch, T., & Arkin, R. T. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*.
- Belta , C., & Kumar, V. (2002). Trajectory design for formations of robots by kinetic energy shaping. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2593-2598.
- Borrell, J., Garcia , E., & Roberto, L. (2005). *Comunicación de datos, redes de computadores y sistemas abiertos*. México .

- Bräunl, T. (1998). *Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embedded Systems*. Springer.
- Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 14-23.
- Brooks, R. A. (n.d.). *Prospects for Human Level Intelligence for Humanoid Robots*. USA: MIT Artificial Intelligence Laboratory.
- Campoverde. (2017). *Desarrollo de dos robots para realizar trabajo cooperativo*. Sangolquí: ESPE.
- Cao, U., Fukunaga, A., & Kahng, A. (1997). *Cooperative Mobile Robotics*. Boston.
- Castillo Merchán, H. A. (2016). Análisis de la gestión de seguridad y fallos en internet de las cosas . *Quito*.
- Cordoba L, J. P., & Mejía L , A. (2004). *Diseño y construcción de un anillo de sensores ultrasónicos para el levantamiento de Mapas de entorno y generación de trayectorias*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Córdoba López, A. (2016). Puesta en marcha de brazo robótico y desarrollo de aplicaciones . *Universidad de Jaén*.
- CQRobot. (2017). Catalogo de motores DC. *CQRobot elementos electrónicos*.
- de la Cruz, C., Carelli, R., & Cristiano, G. (2007). Control Centralizado de Formación.
- Dias, M., Zlot, R., Kaira, N., & Stentz, A. (2006). Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis. *Proceedings of the IEEE*, 1257-1270.
- Eclipse Foundation. (2018, Diciembre 11). *Mosquitto*. Retrieved from <https://mosquitto.org/>
- Fredslund , J., & Mataric, M. J. (2001). Robot formations using only local sensing and control. *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 308-313.
- Galindo , C., & Ruiz- Sarmiento, J. R. (2010). *Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect*. Málaga - España: Universidad de Málaga.

Gallardo Andrade, J., & Gaona Román, A. D. (2015). *Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.

Gallardo López, D. (1999). *Aplicación del muestreo bayesiano en robots móviles: estrategias para localización y estimación de mapas del entorno*. Alicante: Universidad de Alicante.

Garzón Jaramillo, P. M., & Obando Maldonado, C. A. (2016). *Desarrollo de un sistema de Ubicación en la plataforma robótica para exteriores teleoperada*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Gaviria, J., Mora, J., & Agudelo, J. (2002). Historia de los motores de combustión interna. *Facultad de ingeniería*, 66-78.

Gómez Gómez, D. H. (2015). *Desarrollo de una técnica SLAM para ambientes dinámicos tridimensionales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

González, D. E., & Verdugo, A. d. (2018). Diseño e Implementación de una Arquitectura IOT para Robótica Colaborativa.

Gonzales Jiménez, J., & Ollero Baturone, A. (1996). Estimación de la Posición de un Robot Móvil.

Goyeneche, C. A. (2010, Julio 10). *Afición electrónica*. Retrieved from Construcción de mini-robot: <http://carlosgoyeneche.blogspot.com/2010/07/construccion-de-robot.html>

Hamid Taheri, B. Q. (2015). Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, 4.

Holland, J. M. (2004). *Designing Autonomous Mobile Robots: Inside the mind of an Intelligent Machine*. New York: ELSEVIER.

Intel, C. (2018). *Intel NUC*. Retrieved from <https://www.intel.la/content/www/xl/es/homepage.html>

J. Plumpton, J. &. (2014). Atlas motion platform Mecanum wheel Jacobian in the velocity and static force domains. *Transactions- Canadian Society for Mechanical Engineering*, (pp. 251-261).

Jiménez, J., Vallejo, M., & Ochoa, J. (2007). Metodología para el Análisis y Diseño de Sistemas Multi-Agente Robóticos: MAD-Smart.

- Jimeno, J. M. (2017). *Linorobot*. Retrieved from <https://linorobot.org/>
- JS Foundation. (2018, Agosto 14). *Node Red*. Retrieved from <https://nodered.org/>
- K., M., Li, S., Wang, Q., & Shao, Z. (2016). Distributed Multirobot Formation and Tracking Control in Cluttered Environments. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)* .
- Kelin, J., & Pratihari, D. K. (2016). Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods. *Robotics and Autonomous Systems*, 34-42.
- Kelly, R. R. (2004). Control de una pandilla de robots móviles para el seguimiento de una constelación de puntos objetivo. *VI Congreso Mexicano de Robótica, COMRob, Torreón, Coahuila, Mexico, October*.
- KUKA. (2017). *KUKA Robots*. Retrieved from Plataformas de robótica móvil: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/movilidad/plataformas-moviles/kmp-1500>
- Kuo, B. C. (n.d.). *Sistemas de Control Automático*. México: Prentice Hall.
- Lazea. (2001). *Aspects on path planning for mobile robots*. Reporte interno de la Technical University of Cluj-Napoca.
- Lozano, M. A. (2017). Estudio y desarrollo de una aplicación mediante comunicación WiFi.
- Martínez, S., & Sisto, R. (2009). *Campos potenciales*. Montevideo.
- Mattamala Aravena, M. (2013). *Filtro de Kalman extendido con el robot khepera*. Chile: Universidad de Chile.
- Matthies, L., & Shafer, S. (1987). Error Modeling in Stereo Navigation. *IEEE, Journal of Robotics*.
- Mindstorms , L. (2016). *Mindstorms EV3* . Retrieved from <https://www.lego.com/es-ar/mindstorms>
- MQTT.ORG. (2018). *MQTT.ORG*. Retrieved from <http://mqtt.org/>
- Muñoz Martínez, V. F. (1999). *Navegación en Robots móviles*. Málaga.

- National Instrument. (2016, Junio 6). *¿Qué es myRio?* Retrieved from <http://www.ni.com/es-cr/shop/engineering-education/portable-student-devices/myrio-student-embedded-device/what-is-myrio.html>
- Nava Diaz, S., Chavarria Juarez, G., Hervás Lucas, R., & Bravo Rodriguez, J. (2009). Adaptabilidad de las tecnologías RFID y NFC a un contexto educativo. *IEEE* .
- Nilsson, N. J. (1969). *A Mobile Automation: An Applications of Artificial Intelligence Techniques*. California: Standord Research Institute.
- Ollero , A. (2001). *Robótica manipuladores y robots móviles* . Barcelona-España: marcombo.
- Ortigoza, R. S., Marcelino Aranda, M., Ortigoza, G. S., & Hernandez, V. M. (2012). Wheeled Mobile Robots: A review. *IEEE Latin America Transactions; Volume: 10 , Issue: 6*.
- Ortiz, A. (2014). *Navegación para robots móviles*. Palma de Mallorca.
- Oxford, U. (2014). *Dictionary*. Oxford University.
- Pallás, R. (1993). *Adquisición y distribución de señales* . Barcelona : marcombo.
- Pereira Ruíz, S. (2016). *Localización de robots mediante filtro de Kalman*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Pérez Checa, A. R. (2016, Mayo 26). *Aplicación de Algoritmos de Visión Artificial para el Control de Robots Cooperativos Móviles Dentro De Espacios Semi Estructurados*. Retrieved from DSpace EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15940>
- PlatformIO . (2018). *PlatformIO*. Retrieved from <https://platformio.org/>
- Punto Flotante, S. (2006, Febrero 15). *Principios de funcionamiento del encoder cuadratura de efecto Hall para medición de velocidad en motores de corriente directa*. Retrieved from <https://www.puntoflotante.net/FUNCIONAMIENTO-ENCODER-CUADRATURA-EFECTO-HALL.htm>
- Quinaluisa , E., & Toapanta , J. (2018). Implementación de un Sistema de Navegación Autonomo Basado en SLAM y Navegación Reactiva. *Repositorio ESPE*.
- Quinlan, M. J., Chalup, S. K., & Moddleton, R. H. (2003). Techniques for Improving Vision and Locomotion on the Sony AIBO Robot. *School of Electrical Engineering & Computer Science*.

- Quishpe, W., Salas, A., Gordillo, R., & Altamirano, D. (2013). Teleoperación PLataforma Móvil Irobot Create. *Maskay*.
- Ramos, E. R., & Morales, R. (2010, Enero). *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-1-Diagrama-del-robot-movil_fig1_47297317
- Raspberry. (2018). *Catalogo de Productos*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.org>
- Robocup. (2016). Competencia de Robot. *Robocup*.
- RobotShop. (2018). *Robotics at your service*. Retrieved from <https://www.robotshop.com/en/4wd-arduino-compatible-mecanum-robot.html>
- Rodríguez Moya, Á. (2009). *Estudio del filtro de partículas aplicado al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid .
- Rosheim, M. (1994). *Robot Evolution, The development of Anthrobotics*. Toronto.
- Ruiz, J. (2006). Robótica: Estado del Arte . *Universidad de Deusto*.
- Sáenz , A., Bugarin, E., & Santibáñez, V. (2015). Modelado Cinemático y Dinámico de un Robot Móvil Omnidireccional de 4 Ruedas Considerando Dinámica de Actuadores . *Repositorio Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de la Laguna*.
- Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., & Fujimura, K. (2002). The intelligent ASIMO: system overview and integration. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Saltarén Pazmiño, R. J., Azorín Poveda, J. M., Almonacid Kroeger, M., & Sabater Navarro, J. M. (2013). *Prácticas de robótica utilizando Matlab*. Alicante: NBIO.
- Sanchez, S. A., Cabrera, M., & García, R. (2014, Octubre). *academia.edu*. Retrieved from http://www.academia.edu/9614705/Obtenci%C3%B3n_de_Par%C3%A1metros_de_un_Motor_de_CD
- Sergi Hernandez Juan, F. H. (2015, Enero). *The Institut de Robòtica i Informàtica Industrial*. Retrieved from <http://www.iri.upc.edu/>
- Sheridan , T. B., & Ferrell, W. (1963). Remote Manipulative Control with Transmission Delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 25-29.

- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Massachusetts Institute of Technology.
- Silva, R., Garcia, J., Barrientos, V., Molina, M., Hernandez, M., & Silva, G. (2007). Una Panorámica de los Robots Móviles. *Télématique*, 1-9.
- SLAMTEC. (n.d.). *slamtec.com*. Retrieved from slamtec.com
- Soriano Viguera, Á. (2017). Diseño y Programación de Algoritmos para Robot Móviles. *Universidad Tecnica de Valencia*.
- Spyrus, T. (2016). *Sociorobot World*. Springer.
- Stallings, W. (2004). *Comunicaciones y redes de computadores*. Madrid.
- Stipanovica, D. M., Inalhana, G., Teo, R., & Tomlina, C. J. (2004). Decentralized overlapping control of a formation of unmanned aerial vehicles. *Automatica*, 1285-1296.
- Svestka, P., & Overmars, M. H. (n.d.). Coordinated Path Planning for Multiple Robots.
- Swarm Robot. (n.d.). *Swarm Robot*. Retrieved from <http://www.swarmrobot.org/PowerDockingStation.html>
- Tabuenca Alcuson, D. (2017). Implantación de Robots Colaborativos en Línea de Producción. *Universidad de Valladolid*, 15-30.
- Toibero, J. M., Roberti, F., Carrelì, R., & Fiorini, P. (2008). Hybrid Formation Control for Non-Holonomic Wheeled Mobile Robots. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*.
- Turmero, P. (2015). Diseño e implementación de un equipo de robots autónomos con decisiones en tiempo real. *Tecnología Hoy*.
- Ubuntu Wiki. (2018, Mayo 26). *Ubuntu Wiki*. Retrieved from <https://wiki.ubuntu.com/UbuntuFlavors>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- Universidad de Santiago de Chile. (n.d.). *Universidad de Santiago Virtual*. Retrieved from UdeSantiagoVirtual: <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/course/view.php?id=4>
- Universidad Politécnica de Madrid. (2010, Junio 14). Robots que aprenden y se comunican. *sinc*.

- Urdiales García, C. (2006). *Introducción a la robótica*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Vallés Miquel, M., & Valera Fernández, Á. (2014). *Localización de robots móviles de recursos limitados basada en fusión sensorial por eventos*. Valencia: Universidad politécnica de Valencia.
- Vaz, M., Monteiro, S., & Bicho, E. (2004). Attractor dynamics generates robot formations. *from theory to implementation, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2582-2587.
- VDI-2206. (n.d.). Design methodology for mechatronic systems.
- Villarroel S., C. (2009). *Diseño en implementación de un equipo de robots autónomos que toman decisiones en tiempo real: fútbol robótico -componente inteligente*. Retrieved from DSpace ESPOL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/136>
- Wang, C. (1988). Location Estimation and Uncertainty Analysis for Mobile Robots. *IEEE, Robotics and Automation* , 1230-1235.
- Yamaguchi, H., Aria, T., & Beni, G. (2001). A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formation. *Robotics and Autonomous Systems*, 125-147.
- YellowScan. (2004). *LiDAR 3D mapping can penetrate vegetation*. YellowScan.
- Yunwang Li, S. D. (2018). Modeling and Kinematics Simulation of a Mecanum Wheel Platform in RecurDyn. *Journal of Robotics*, 7.

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO

ANEXO B. PLANOS