







# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

*Trabajo Terminal II*

**“Coordinación de dos robots móviles terrestres bajo  
un esquema líder seguidor”**

*Que para obtener el título de  
“Ingeniero en Mecatrónica”*

Presentan:

**Mauricio Sánchez Ortega**

**David Alejandro Toro Sandoval**

**Luis Fernando Zarazua Aguilar**

Asesores:

**Dr. Juan Luis Mata Machuca**

**M. en C. Mauricio Méndez Martínez**



Mayo 2019





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN  
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

*Trabajo Terminal II*

## “Coordinación de dos robots móviles terrestres bajo un esquema líder seguidor”

*Que para obtener el título de*

**“Ingeniero en Mecatrónica”**

Presentan:

---

Mauricio Sánchez Ortega

---

David Alejandro Toro Sandoval

---

Luis Fernando Zarazua Aguilar

Asesores:

---

Dr. Juan Luis Mata Machuca

---

M. en C. Mauricio Méndez Martínez

**Presidente del Jurado**

**Profesora Titular**

---

Dra. Blanca Rosa Briseño Tepepa

---

M. en C. Griselda Sánchez Otero



# DEDICATORIA

*“La única diferencia que existe entre el éxito y el fracaso está en los ojos con los que te miras”.*

Esta obra está dedicada a nuestros compañeros, amigos, familiares, maestros y a ti, amigo lector, sin embargo, además dado el mérito y esfuerzo involucrados directa e indirectamente decidimos dedicar esta obra a la sociedad, donde más allá de solamente reflejar nuestros conocimientos técnicos sobre la ingeniería mecatrónica, también les compartimos un ideal de proseguir en el beneficio de la humanidad y correr hasta la meta de la vida sin mirar atrás. A lo largo de este trabajo pasamos por diversas pruebas que enfrentamos en equipo, practicando la empatía y luchando contra la desesperación y el estrés, experimentando en cada una de las fases la bendición de Dios tanto en el ámbito profesional como en el psicológico, complementando de esta manera día a día nuestro desarrollo personal.

Esperamos que esta obra te sea de mucha utilidad, que te sirva como un punto de partida superior del que nosotros comenzamos y que encuentres valioso el conocimiento aquí reflejado muchas bendiciones.

*Salmos 94:12-13 Dichoso aquel a quien tú, SEÑOR, corriges; aquel a quien instruyes en tu ley, para que enfrente tranquilo los días de aflicción, mientras al impío se le cava una fosa.*



# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido terminar una de las etapas más importantes de mi vida, esperando que sus planes y mis planes sigan coincidiendo.

A mi familia que siempre ha estado ahí, apoyándome en cada paso que doy y que nunca han dejado de creer en mí. En especial a mi mamá que sufrió conmigo cada incertidumbre y desvelo y a mi papá que siempre ha estado ahí ayudándome.

Al Dr. Juan Luis Mata Machuca por habernos dado el beneficio de la duda y habernos permitido llevar a cabo este proyecto que, sin su buena voluntad, este proyecto jamás se hubiera realizado, además de que siempre estuvo en la mejor disposición de ayudarnos en cualquier cosa; resolviéndonos cualquier duda, aconsejándonos.

A la profesora Griselda Sánchez Otero que nos guío durante todo un año y que, sin su pericia, este trabajo no se hubiera culminado de forma exitosa.

A mis compañeros de equipo Zarazua y Toro por haberme permitido pasar todo un año de arduo trabajo a su lado y que sin su empeño esto nunca hubiera salido.

*Mauricio Sánchez Ortega*

A nuestros padres y profesores por mostrarnos el camino de la superación. A nuestros amigos por permitirnos aprender de la vida a su lado.

*David Alejandro Toro Sandoval*

Te agradezco SEÑOR, tu poder me mantiene con vida, porque siempre estuve contigo, me has tomado de la mano derecha y me has guiado según tu consejo a lo largo de este camino, para recibirme con grandes honores. Gracias Padre porque me pusiste con las personas correctas y nos has dotado de la tenacidad para proseguir hasta la meta.

A mis padres por su inmenso amor, que no puede ser comparado con oro o plata, en el cual he encontrado un verdadero tesoro.



A mis amados hermanos Francisco y Daniel por brindarme su ayuda en distintas ocasiones a lo largo de mis estudios, por su alegre compañía y su invaluable amor filial.

A mi inolvidable UPIITA, IPN, noble casa de estudios que llenó mi alma de conocimientos y amor por la Ingeniería, quien fue mi segundo hogar en estos últimos años y a quien por siempre estaré agradecido.

A todos los miembros de mis queridas Familias Zarazua y Aguilar, por siempre darme ánimo para proseguir en mis estudios, por sus atinados consejos, sus felicitaciones y por muchas más cosas que he vivido con ellos.

A mis respetados profesores de Trabajo Terminal por compartir con nosotros sus valiosos conocimientos y experiencias, al Dr. Juan Luis Mata Machuca, por proponer y financiar el proyecto, además de compartirnos su valioso conocimiento en control. A la M. en C. Griselda Sánchez Otero por su idónea orientación en la redacción de este trabajo. Al M. en C. Mauricio Méndez Martínez por su ayuda en la implementación del código y por transmitirnos el gusto por la programación. Al M. en C. Juan Carlos Guzmán Salgado por su genuino interés en la edición de nuestro documento.

Con gran agradecimiento a todos mis profesores de mis diversas etapas escolares de quienes tuve el honor de haber recibido sus valiosas enseñanzas, el valor del arduo trabajo, y la amistad que me dieron, haciendo mención especial al M. en C. Álvaro Gordillo, al M. en C. Emilio Brito, al M. en C. Benjamín Trejo y al Ing. Erick Huitrón.

A mis compañeros de equipo Mauricio y David por ser empáticos, copartícipes y dedicar todo su tiempo, empeño y esfuerzo a lo largo de este Trabajo Terminal, viviendo no solo experiencias académicas sino también de amistad.

A mis amigos que bien saben que están en mi corazón, a ellos les agradezco su amistad, energía, momentos alegres, inspiración, experiencias únicas y una estancia de confianza y fraternidad a lo largo de mi vida estudiantil. Siempre teniendo en mente a mis amigos Saúl Salazar, César Contreras, Itan Zoali, Francisco Villanueva, Alejandro Ramírez, Mike Rodríguez, Isaí García, Guillermo Alessandro Alva, Luis

Ángel Méndez, Exel Dávila, Francisco Morales, Rogelio Caballero, Aldo Arenales, Rafael Guzmán, Brandon Quintín, Carlos García, Rafael Trovamala, Alberto Rivera, Luis Fernando Almanza, David Menchaca, Miguel Cuéllar, Edmundo Morado, Aaron Ramírez, Luis Sánchez, Karla Rodríguez, Laura Maruri, Irari Jiménez, Uriel Meneses, Iván Marroquín y en especial Arturo Clemente y Efraín Paredes porque además de ser muy buenos amigos fueron un ejemplo mi vida de cómo seguir a Cristo.

*Luis Fernando Zarazua Aguilar*



---

## Contenido

---

<b>Nomenclatura</b>	<b>xxi</b>
<b>Glosario</b>	<b>xxv</b>
<b>Resumen/Abstract</b>	<b>xxix</b>
<b>Objetivos</b>	<b>xxxI</b>
<b>Introducción</b>	<b>xxxIII</b>
Antecedentes . . . . .	xxxIV
Nacionales . . . . .	xxxIV
Internacionales . . . . .	xxxVI
Planteamiento del problema . . . . .	xxxVII
Organización del reporte . . . . .	xxxVIII
<b>1. Marco de referencia</b>	<b>1</b>
1.1. Marco teórico . . . . .	1
1.1.1. Robots móviles terrestres . . . . .	1
1.1.2. Cinemática de robots móviles . . . . .	2



1.1.3.	AMCL . . . . .	4
1.1.4.	VFH (Vector Field Histogram) . . . . .	5
1.1.4.1.	Primer nivel: <i>Mapa 2D</i> . . . . .	6
1.1.4.2.	Segundo nivel: <i>Histograma polar</i> . . . . .	6
1.1.4.3.	Tercer nivel: <i>Comando de dirección</i> . . . . .	7
1.1.5.	Esquemas líder - seguidor . . . . .	8
1.2.	Marco Procedimental . . . . .	9
1.2.1.	Sistema mecatrónico . . . . .	9
1.2.2.	Diseño mechatrónico . . . . .	10
1.2.3.	Proceso de análisis jerárquico (AHP) . . . . .	10
<b>2.</b>	<b>Diseño del Sistema</b>	<b>13</b>
2.1.	Diseño Conceptual . . . . .	13
2.1.1.	Necesidades y requerimientos . . . . .	13
2.1.2.	Descomposición por áreas funcionales . . . . .	16
2.1.2.1.	Área Funcional 1: <i>Estructura</i> . . . . .	17
2.1.2.2.	Área Funcional 2: <i>Procesamiento</i> . . . . .	17
2.1.2.3.	Área Funcional 3: <i>Percepción</i> . . . . .	18
2.1.2.4.	Área Funcional 4: <i>Alimentación</i> . . . . .	18
2.1.2.5.	Área Funcional 5: <i>Movimiento</i> . . . . .	18
2.1.3.	Características y/o necesidades principales de cada área funcional . . . . .	19
2.1.4.	Características principales de los robots considerados. ROS-bot, Turtlebot, TX1 “Jet” Robot Kit . . . . .	20
2.1.4.1.	Rosbot . . . . .	21
2.1.4.2.	Turtlebot3 Burger . . . . .	22
2.1.4.3.	TX1 “Jet” Robot Kit . . . . .	23
2.1.5.	Tablas de selección de los robots móviles . . . . .	23
2.1.6.	Criterios para el diseño y selecciones de interfaces gráficas . .	26



2.1.6.1.	Criterios a evaluar . . . . .	26
2.1.6.2.	<i>Amabilidad</i> . . . . .	26
2.1.6.3.	<i>Interactivida</i> . . . . .	26
2.1.6.4.	<i>Redundancia óptima en el proceso de comunicación</i> . . . . .	26
2.1.6.5.	<i>Eficiencia y utilidad</i> . . . . .	26
2.1.6.6.	Tabla de Criterios . . . . .	27
2.1.6.7.	Lista de opciones de interfaz . . . . .	28
2.1.6.8.	Diseño de arquitectura general del software . . . . .	28
2.1.6.9.	Concepto Final . . . . .	31
2.2.	Diseño Detallado . . . . .	33
2.2.1.	Área Funcional 1: <i>Estructura (Soporte de componentes)</i> . . . . .	34
2.2.1.1.	Elementos primordiales de la estructura . . . . .	34
2.2.1.2.	Elementos utilizados en cada piso . . . . .	36
2.2.1.3.	Dimensiones . . . . .	39
2.2.2.	Área Funcional 2: <i>Procesamiento (Comunicación de componentes)</i> . . . . .	39
2.2.2.1.	Primera parte: <i>Dispositivos destinados para el procesamiento</i> . . . . .	40
2.2.2.2.	Segunda parte: <i>Funciones a desarrollar en cada tarjeta</i> . . . . .	45
2.2.2.3.	Tercera parte: <i>Diseño del software</i> . . . . .	46
2.2.3.	Área Funcional 3: <i>Percepción (Comunicación entorno - robot)</i> . . . . .	62
2.2.3.1.	Datos propioceptivos . . . . .	63
2.2.3.2.	Encoders rotatorios . . . . .	63
2.2.3.3.	Encoder óptico rotatorio de tipo relativo o incremental . . . . .	63
2.2.3.4.	Encoder óptico absoluto . . . . .	64
2.2.3.5.	Acelerómetros . . . . .	65
2.2.3.6.	Datos exteroceptivos . . . . .	65
2.2.3.7.	Sensores láser . . . . .	65
2.2.3.8.	Sensor LIDAR LDS-01 . . . . .	67

## CONTENIDO

---



2.2.3.9. Dimensiones . . . . .	68
2.2.3.10. Acondicionamiento . . . . .	69
2.2.4. Área Funcional 4: <i>Alimentación (Suministro de energía)</i> . . . . .	70
2.2.4.1. Características Técnicas de la batería LiPo. . . . .	72
2.2.4.2. Ensamble de la batería LiPo con la estructura . . . . .	72
2.2.5. Área Funcional 5: <i>Movimiento (Desplazamiento del robot)</i> . . . . .	73
2.2.5.1. Actuadores Dynamixel . . . . .	74
2.2.5.2. Análisis interno del motor . . . . .	75
2.2.5.3. Características del motor . . . . .	77
2.2.6. Integración del Sistema . . . . .	83
2.2.6.1. Elementos de Software . . . . .	85
2.2.7. HMI . . . . .	88
2.2.7.1. Comunicación peer to peer . . . . .	88
2.2.8. Validación y análisis de resultados . . . . .	89
2.2.8.1. Procesamiento . . . . .	90
2.2.8.2. Seguimiento de trayectoria . . . . .	90
2.2.8.3. Líder Seguidor . . . . .	93
2.2.8.4. Evasión de obstáculos . . . . .	94
<b>3. Integración del Sistema</b> . . . . .	<b>95</b>
3.1. Implementación del Área Funcional Estructura . . . . .	95
3.1.1. Recomendaciones a considerar . . . . .	95
3.1.2. Armado de los robots móviles . . . . .	96
3.1.3. Resultados del proceso de armado . . . . .	101
3.1.4. Verificación de ensamble del sistema . . . . .	103
3.2. Implementación del Área Funcional Movimiento . . . . .	103
3.3. Implementación del Área Funcional Percepción . . . . .	104
3.3.1. Sensor LIDAR . . . . .	104
3.3.2. Sensores del motor DYNAMIXEL . . . . .	108



3.4. Implementación del Área Funcional Alimentación . . . . .	110
3.5. Implementación del Área Funcional Procesamiento . . . . .	110
3.5.1. Pasos previos . . . . .	110
3.5.2. Comunicación . . . . .	112
3.5.3. Prueba A: Verificación de la matriz de fuerza . . . . .	116
3.5.3.1. Análisis de resultados . . . . .	118
3.5.4. Prueba B: Validar el seguimiento de trayectoria . . . . .	118
3.5.4.1. Análisis de resultados . . . . .	120
3.5.5. Prueba C: Validar el algoritmo Líder-Seguidor . . . . .	120
3.5.5.1. Análisis de resultados . . . . .	121
3.5.6. Prueba D: Validar la evasión de obstáculos . . . . .	121
3.5.6.1. Validación de seguimiento y evasión . . . . .	126
3.5.7. Prueba E: Validar la integración de evasión y seguimiento . .	127
3.5.7.1. Análisis de resultados . . . . .	128
3.5.8. Realización de la HMI . . . . .	128
3.5.8.1. Programa Principal . . . . .	133
3.5.8.2. Ventana Gráfica . . . . .	133
3.5.8.3. Programa de ROS . . . . .	134
3.5.8.4. Framework de Trabajo . . . . .	134
3.5.8.5. Puntos importantes a considerar . . . . .	135
3.5.8.6. Modificación del Programa . . . . .	136
3.5.8.7. Resultados de la ejecución . . . . .	136
3.6. Especificaciones del Sistema . . . . .	140
3.6.0.1. Especificaciones del Área de Trabajo . . . . .	140
3.6.0.2. Especificaciones de la Alimentación . . . . .	140
3.6.0.3. Especificaciones del Procesamiento . . . . .	140
<b>4. Análisis de Costo</b>	<b>143</b>
4.1. Costos variables . . . . .	143

*CONTENIDO*

---



4.2. Costos fijos . . . . .	144
4.3. Costo total . . . . .	146
<b>5. Conclusiones</b>	<b>147</b>
<b>Apéndices</b>	<b>157</b>
<b>Apéndice 1. Nodos en ROS</b>	<b>159</b>
<b>Anexos</b>	<b>165</b>
<b>Anexo 1. Programas Usados</b>	<b>167</b>
<b>Anexo 2. Criterios de selección en Áreas funcionales</b>	<b>169</b>

---

## Índice de figuras

---

1.	(a) Robot Repartidor Autónomo. (b) Generación de trayectoria [8]. . .	xxxv
2.	Ejecución del Sistema de Navegación Evasor de Obstáculos implementando un robot Turtlebot2 [18]. . . . .	xxxv
3.	Control de la formación en un plano. Trabajo de investigación de la Universidad de California [42]. . . . .	xxxvii
1.1.	<i>Ciclo: Ve, piensa, actúa.</i> Componentes que conforman un robot móvil autónomo. . . . .	2
1.2.	Marco de referencia global y el marco de referencia local del robot. .	2
1.3.	Parámetros de una configuración diferencial. . . . .	4
1.4.	Algoritmo AMCL. . . . .	5
1.5.	Ejemplo de histograma polar. . . . .	7
2.1.	Áreas Funcionales propuestas. . . . .	16
2.2.	Robot móvil Rosbot [39]. . . . .	21
2.3.	Robot móvil Turtlebot3 Burger [22]. . . . .	22
2.4.	Robot móvil TX1 “Jet” [14]. . . . .	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



2.5. Opciones de interfaces gráficas . . . . .	28
2.6. Tipos de Arquitecturas . . . . .	29
2.7. Arquitectura de software propuesta para el proyecto . . . . .	30
2.8. Concepto final . . . . .	31
2.9. Integración de todas las Áreas Funcionales. . . . .	33
2.10. Ensamble de 2 pisos o chapas en forma de celda (base estructural). .	35
2.11. Estructura tipo multiplataforma. . . . .	35
2.12. Dimensiones del Turtlebot3 [32]. . . . .	39
2.13. Tarjeta ARM Cortex M7 [34]. . . . .	44
2.14. Tarjeta Raspberry PI 3, Modelo B [31]. . . . .	45
2.15. Entrada y salida del programa que genera la matriz de fuerza. . . . .	47
2.16. Algoritmo Generador de la Matriz de Fuerza. . . . .	47
2.17. Diagrama de Flujo para la rutina “Obtener el punto meta”.	48
2.18. Diagrama UML del objeto <i>MovementLeader</i> a implementar en el nodo del líder. . . . .	48
2.19. Diagrama de flujo del programa principal del nodo del líder. . . . .	49
2.20. Diagrama de flujo del método “Follow”. . . . .	49
2.21. Diagrama de flujo del método “VectorFieldHistogram”. . . . .	50
2.22. Diagrama de flujo del método “Move to angle”. . . . .	51
2.23. Diagrama de flujo de los “Callbacks”. . . . .	52
2.24. Representación de las distancias entre el líder y el seguidor. . . . .	52
2.25. Diagrama UML del objeto <i>FollowerRobot</i> a implementar en el nodo seguidor. . . . .	53
2.26. Diagrama de flujo del programa principal del nodo seguidor. . . . .	54
2.27. Diagrama de flujo de los Callbacks para obtención de datos. . . . .	54
2.28. Diagrama de flujo del método <i>FollowerCallback</i> . . . . .	55
2.29. Diagrama UML para nodo de distancia mínima. . . . .	56
2.30. Diagrama de flujo del programa principal del nodo de distancia mínima.	56
2.31. Diagrama de flujo método para obtener la distancia mínima al obstáculo.	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



2.32. Diagrama UML para nodo LaserVFH. . . . .	58
2.33. Diagrama de flujo del programa principal del nodo LaserVFH. . . . .	58
2.34. Diagrama de flujo para generar histograma binario. . . . .	59
2.35. Configuración de la IP para la comunicación vía WiFi [22]. . . . .	61
2.36. Ejemplo de configuración WIFI [30]. . . . .	61
2.37. Funcionamiento del encoder absoluto. . . . .	64
2.38. Funcionamiento de un sensor láser. . . . .	66
2.39. Funcionamiento del sensor LIDAR. . . . .	66
2.40. Dimensiones del sensor LIDAR. Vista superior y lateral. . . . .	68
2.41. Vista Frontal del sensor LIDAR. . . . .	68
2.42. Pines del sensor LIDAR. . . . .	69
2.43. Ubicación de la batería de alimentación. Primera capa del Turtlebot3. .	71
2.44. Batería LiPo, con su entrada y salida [33]. . . . .	71
2.45. Ensamble de la batería LiPo en la primera capa del Turtlebot3. . . .	72
2.46. Ensamble del rin y la llanta de los robots. . . . .	73
2.47. Estructura de la locomoción de los robots. . . . .	74
2.48. Ensamble de los actuadores con la estructura. . . . .	74
2.49. Explosión del motor del Dynamixel. . . . .	75
2.50. Características del actuador. . . . .	76
2.51. Sistema de locomoción en conjunto con los actuadores Dynamixel XL 430 - W250. . . . .	76
2.52. Sistema de locomoción en conjunto con los actuadores Dynamixel XL 430 - W250. Vista frontal e inferior. . . . .	77
2.53. Nomenclatura de los actuadores Dynamixel [27]. . . . .	77
2.54. Gráfica de funcionamiento del motor DYNAMIXEL [27]. . . . .	81
2.55. Interfaz de programación de los actuadores Dynamixel. . . . .	82
2.56. Capa 1. Implementación de la capa con los actuadores y la batería LiPo. .	83
2.57. Capa 2. Implementación de la capa 1, capa 2 y tarjeta Open CR. . .	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



2.58. Capa 3. Implementación de la capa 1, capa 2, capa 3 y tarjeta Raspberry Pi 3. . . . .	84
2.59. Vista isométrica del robot con todas las capas ensambladas. . . . .	84
2.60. Explosión y distribución de los componentes que conforman al robot.	85
2.61. Esquema general de funcionamiento del sistema de control para el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos. . . . .	86
2.62. Esquema general de funcionamiento del sistema de control para el seguidor. . . . .	86
2.63. Comunicación entre tópicos de los distintos nodos. . . . .	87
2.64. Conexión típica de ROS. . . . .	88
2.65. Ejemplo de comunicación de ROS con agentes externos. . . . .	89
2.66. Trayectoria propuesta 1 (unidades en metros). . . . .	91
2.67. Trayectoria propuesta 2 (unidades en metros). . . . .	91
2.68. Matriz de fuerza para trayectoria propuesta 1 (unidades en metros).	91
2.69. Matriz de fuerza para trayectoria propuesta 2 (unidades en metros).	92
2.70. Resultados extraídos de la simulación de seguimiento de trayectoria (unidades en metros). . . . .	92
2.71. Resultados extraídos de la simulación del líder (unidades en metros).	93
2.72. Resultados extraídos de la simulación del seguidor (unidades en metros).	93
2.73. Obstáculos para la validación del algoritmo propuesto. . . . .	94
2.74. Puntos de ruta alcanzados por el líder durante la evasión de obstáculos (unidades en metros). . . . .	94
3.1. Caja con los diferentes componentes del robot. . . . .	96
3.2. Caja 1. <i>MicroSD, Raspberry Pi 3, motores Dynamixel y tarjeta OpenCR Cortex M7</i> . . . . .	97
3.3. Caja 2. <i>Batería LiPo, cargador, desarmador, sensor LIDAR, conector USB2LDS y soportes para pcb's</i> . . . . .	97
3.4. Caja 3. “Waffle - Plate”pisos de los robots . . . . .	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



3.5. Caja 4. <i>Llantas, ruedas, tornillos, piezas de ensamble, cables y una rueda loca</i> . . . . .	98
3.6. Fuente de voltaje para batería LiPo. . . . .	99
3.7. Unión de los pisos del robot. . . . .	99
3.8. Piezas Ensambladas. . . . .	100
3.9. Ensamble del robot. . . . .	100
3.10. Ensamble del primer piso. . . . .	101
3.11. Ensamble del segundo piso. . . . .	101
3.12. Ensamble del tercer piso. . . . .	102
3.13. Ensamble final del robot. . . . .	102
3.14. Robot líder y robot seguidor. . . . .	103
3.15. Implementación del área funcional movimiento. . . . .	104
3.16. Montaje del sensor LIDAR en la estructura. . . . .	105
3.17. Sensor LIDAR del Turtlebot 3 burger. . . . .	106
3.18. Distancias del LIDAR en RVIZ . . . . .	107
3.19. Visualización en rqt de los valores del sensor LIDAR. . . . .	107
3.20. Motores DYNAMIXEL XL430. . . . .	108
3.21. Ensamble de los motores, OpenCR y batería LiPo. . . . .	108
3.22. Localización de los botones de prueba en la tarjeta OpenCR. . . . .	109
3.23. Batería LiPo LB-012. . . . .	110
3.24. Creación de una nueva red en Ubuntu. . . . .	113
3.25. Elegir tipo de conexión. . . . .	113
3.26. Configuración del modo y nombre. . . . .	114
3.27. Configuración de la seguridad. . . . .	114
3.28. Muestra del resultado correcto de la ejecución del comando ping. . . . .	115
3.29. RQt mostrando los datos del tópico battery. . . . .	115
3.30. Reconstrucción de la trayectoria A. . . . .	116
3.31. Reconstrucción de la trayectoria B. . . . .	117
3.32. Reconstrucción de la trayectoria C. . . . .	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



3.33. Puntos de trayectoria A. . . . .	117
3.34. Puntos de trayectoria B. . . . .	118
3.35. Puntos de trayectoria C. . . . .	118
3.36. Error del líder en seguimiento de la trayectoria A. . . . .	119
3.37. Error del líder en seguimiento de la trayectoria B. . . . .	119
3.38. Gráfica de las posiciones alcanzadas y el error. . . . .	120
3.39. Error del seguidor en la trayectoria A. . . . .	121
3.40. Error del seguidor en la trayectoria B. . . . .	121
3.41. Método para calcular la distancia mínima y publicarla. . . . .	122
3.42. Detección del obstáculo cercano colocado en el primer cuadrante. . .	123
3.43. Detección del obstáculo cercano colocado en el cuarto cuadrante. . .	123
3.44. Función Follow para ejecutar VFH o seguimiento de trayectoria. . .	124
3.45. Función de seguimiento de trayectoria por dirección. . . . .	125
3.46. Algoritmo para aplicar VFH. . . . .	125
3.47. Error del robot líder durante la evasión. . . . .	127
3.48. Error del robot seguidor durante la evasión. . . . .	127
3.49. RQt para graficar distintos tópicos con respecto al tiempo. . . . .	128
3.50. RQt mostrando y filtrando los distintos tipos de mensajes. . . . .	129
3.51. Pantalla de bienvenida de QtCreator. . . . .	130
3.52. Ventana para compilar paquete en QtCreator. . . . .	130
3.53. Ingreso de la carpeta de compilación. . . . .	131
3.54. Ingreso y compilación con el comando CMake. . . . .	132
3.55. Ventana en Qt con el paquete qgui. . . . .	132
3.56. Framework de Qt para GUI. . . . .	135
3.57. Ventana inicial de la interfaz. . . . .	137
3.58. Configuración de la interfaz con la trayectoria 1 seleccionada y apagada.	137
3.59. Configuración de la interfaz con la trayectoria 2 seleccionada y encen-	
dida. . . . .	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

---



3.60. Configuración de la interfaz con la trayectoria 3 seleccionada y encen-	
dida. . . . .	138
3.61. Interfaz con los mensajes de prueba enviados. . . . .	139
3.62. Interfaz con el historial de trayectorias seleccionadas. . . . .	139
3.63. Interfaz mostrando las opciones de graficación. . . . .	140
3.64. Nodos de Rosgraph. . . . .	141
1.   Configuración de nodos en ROS parte A . . . . .	159
2.   Configuración de nodos en ROS parte B . . . . .	160
3.   Configuración de nodos en ROS parte C . . . . .	161
4.   Configuración de nodos en ROS parte D . . . . .	162
5.   Configuración de nodos en ROS parte E . . . . .	163
6.   Código QR para la consulta de los códigos empleados. . . . .	167



---

## Índice de Tablas

---

2.1.	Tabla de Necesidades . . . . .	14
2.2.	Tabla de Selección: Procesamiento. . . . .	24
2.3.	Tabla de Selección: Percepción. . . . .	24
2.4.	Tabla de Selección: Estructura. . . . .	25
2.5.	Tabla de Selección: Motores y Controladores. . . . .	25
2.6.	Tabla de Selección de las diferentes opciones de interfaz. . . . .	27
2.7.	Comparación entre Arquitecturas . . . . .	29
2.8.	Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte A [34] . . . . .	41
2.9.	Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte B [34]. . . . .	42
2.10.	Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte C [34]. . . . .	43
2.11.	Características de la tarjeta Raspberry Pi 3, Modelo B [31]. . . . .	44
2.12.	Características del sensor LIDAR. . . . .	67
2.13.	Descripción de los pines del sensor LIDAR. . . . .	69
2.14.	Descripción de los pines del motor del sensor LIDAR. . . . .	70
2.15.	Comandos para operación del LIDAR. . . . .	70
2.16.	Especificaciones técnicas de la batería. [11] . . . . .	72

## ÍNDICE DE TABLAS

---



2.17. Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte A [26]. . . . .	78
2.18. Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte B [26]. . . . .	79
2.19. Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte C [26]. . . . .	80
4.1. Tabla de costos variables. . . . .	144
4.2. Días trabajados en TT1. . . . .	144
4.3. Días trabajados TT2. . . . .	145
4.4. Total de días y horas trabajadas. . . . .	145
4.5. Costo total de gastos fijos. . . . .	145
1. Tabla de selección para Percepción . . . . .	169
2. Tabla de selección para Estructura . . . . .	170
3. Tabla de selección para Procesamiento . . . . .	171
4. Tabla de selección para Motores . . . . .	172

---

## Nomenclatura

---

### Lista de nomenclaturas

2D - Dos dimensiones

3D - Tres dimensiones

A - Ampere

ABD - Acrylonitrile Butadiene Styrene

A-h - Ampere-hora

AI - Artificial Intelligence

AMCL - Adaptative Monte Carlo Localization

APH - Analytic Hierarchy Process

CAN - Controller Area Network

cm - Centímetro

DFU - Device Firmware Upgrade

FLA - Follower Leader Approach

FPU - Floating Point Unit

g - Gramos

GB - Gigabyte

GPIO - General Purpose Input/Output

HMI - Human Machine Interface

## Nomenclatura

---



I2C - Inter-Integrated Circuit

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

Jet - TX1 “Jet” Robot Kit

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED - Light-Emitting Diode

LFA - Lider Follower Algorithm

LIDAR - Laser Imaging Detection and Ranging

LiPo - Polímero de Litio

m - Metros

m/s - Metros por segundo

mA - MiliAmpere

MCL - Monte Carlo Localization

mm - Milímetro

MRS - Multi Robot Sistems

OTG - On The Go

PCM - Protection Circuit Module

PO - Programación orientada a objetos

PWM - Pulse-Width Modulation

RAM - Random Access Memory

RBP - Raspberry Pi

ROS - Robotic Operating System

RTC - Real Time Clock

s - Segundo

SLAM - Simultaneous Localization And Mapping

SMPS - Switched-Mode Power Supply

SPI - Serial Peripheral Interface

SSH - Secure SHell

Tb3 - Turtlebot 3 burger

TTL - Transistor-Transistor Logic

UML - Unified Modeling Language

USB - Universal Serial Bus

V - Volts

VFH - Vector Field Histogram

WPL - Lista de puntos de ruta



---

## Glosario

---

### ROS

Por sus siglas en inglés *Robot Operating System* (Sistema Operativo Robótico), es un sistema operativo para robots que posé herramientas, librerías y convenciones para ayudar a los desarrolladores de software a crear aplicaciones, con el objetivo de simplificar la tarea de crear complejos y robustos sistemas robóticos, proveyendo de varios ambientes de desarrollo especializado en programas y aplicaciones robóticas [44].

### Nodo en ROS

Un *nodo* es un proceso que ejecuta un cálculo, el cual se visualiza en un gráfico como un punto de intersección para mejor la comprensión y se comunica con otros nodos mediante *tópicos* en ejecución. Un nodo esta diseñado para operar en una escala finita. Un ejemplo de como funcionan los nodos se podría ver en un sistema para controlar un robot; existirá un nodo para cada acción del robot, es decir, habrá un nodo que controle cada sensor que el robot tenga, habrá otro nodo que controle los motores del robot, la localización, la planificación de la trayectoria, habrá un nodo más que proporcione una vista gráfica del sistema y otro que manipule todos



los datos obtenidos del sensando y así, de la misma manera para cada acción o tarea que tenga que ejecutar el robot.

## Tópico

Un *tópico* es el nombre con el cual se identifica el contenido de un *mensaje*, el cual, literalmente se puede ver como un tema de conversación [44]. Cuando un nodo está interesado en un determinado tipo de dato se *subscribe* al tópico correspondiente, por ejemplo, al estado de la batería de un determinado robot, en donde puede haber varios publicadores y suscriptores concurrentes en un mismo tópico. De igual manera un sólo nodo puede publicar y/o suscribirse a múltiples tópicos con el fin de extraer todos los datos que el nodo necesite procesar para dar una salida [2].

## Mensaje en ROS

Los *nodos* se comunican entre sí mediante la publicación de *mensajes* a los tópicos. Un *mensaje* es una estructura de datos simple, que comprende campos escritos [37]. En otras palabras, la forma en que un nodo envía o recibe información es a través de un *mensaje*.

## Namespace

Un *namespace* es un identificador que se le pone a los tópicos con el fin de diferenciar uno del otro cuando se tienen tópicos con un mismo nombre. Por ejemplo, cuando se tienen más de una variable con mismo nombre como en el caso de dos o más baterias baterias o dos o más actuadores, se les ponen un índice identificado para diferenciar uno del otro.

## Callback

*Callback* o *devolución de llamada*, es una función en ROS que controla los mensajes, es decir, cada vez que llega un mensaje ROS llama a su *message manager* (administrador de mensajes) y le pasa el nuevo mensaje, para que este comience a trabajar con base en el mensaje recibido. En resumen, ejecuta la función al momento de recibir un mensaje actuando como una interrupción al sistema.

## Framework

Un *framework* es una estructura compuesta de componentes personalizables e intercambiables para el desarrollo de un programa o aplicación. En otras palabras, una framework se puede considerar una aplicación genérica incompleta y configurable a la que le podemos añadir las últimas piezas para construir una aplicación concreta [12].

## Filtrado de partículas

El *filtrado de partículas* consiste en estimar los estados internos de los sistemas dinámicos cuando se hacen observaciones parciales, y las perturbaciones aleatorias están presentes en los sensores y en el sistema dinámico. El objetivo del filtrado de partículas es calcular las distribuciones posteriores de los estados en algún proceso de *Markov*, dadas algunas observaciones ruidosas y parciales.

## RViz

Es una herramienta de visualización 3D que pose ROS cuya principal característica es mostrar mensajes en 3D, permitiendo la verificación visual de los datos [44].



## Gazebo

Es un simulador 3D independiente que soporta ROS y que permite el diseño de robots, la prueba de algoritmos, el análisis de regresiones, el entrenamiento de inteligencia artificial, etc., y el cual es capaz de soportar a varios robots. La principal diferencia entre RViz está en que RViz es una herramienta de visualización la cual no permite obtener los cambios físicos en los robots como inercia, toque, colisión etc., ni tampoco obtener información del entorno circundante en tiempo real [44].

## Rqt

Es una herramienta para la creación de GUIs (por sus siglas en inglés *Graphical User Interface*) que posee alrededor de 30 herramientas para el desarrollo y que viene integrada a partir de la versión ROS Fuerte [44].

## Qt

Es un framework multiplataforma utilizado ampliamente en la programación de GUIs y del cual, rqt esta basado [44].

---

## Resumen/Abstract

---

*“Coordinación de dos robots móviles terrestres bajo un esquema líder-seguidor”*

**Palabras Clave:** Líder, seguidor, autónomo, robots móviles, navegación, control, robótica cooperativa, seguimiento de trayectoria, turtlebot3, ROS, LIDAR, evasión de obstáculos, mapeo, SLAM, VFH.

**Abstract:**

This work describes the proposal for the design, implementation and validation for the control of two land mobile robots under a *LFA*, where, the leading robot will have the task of following a predetermined trajectory for a user, with the autonomy to dodge fixed objects and share information of the waypoints reached, to the follower robot. The follower robot will have the ability to imitate the movements of the leading robot based on the information received and follow it. All this developed in controlled surfaces and environments.

**Resumen:**

Este trabajo describe la propuesta para el diseño, implementación y validación para el control de dos robots móviles terrestres bajo un esquema “*lider-seguidor*”,

## Resumen/Abstract

---



donde, el robot líder tendrá la tarea de seguir una trayectoria predeterminada por un usuario, con la autonomía para esquivar objetos fijos y compartir información de la posición de dichos objetos con el robot seguidor. El robot seguidor tendrá la capacidad de imitar los movimientos del robot líder con base en la información proporcionada por parte del robot líder. Todo esto desarrollado en superficies y ambientes controlados.

---

## Objetivos

---

### Objetivo general

Coordinar dos robots móviles terrestres bajo un esquema “*líder-seguidor*” para el seguimiento de trayectorias predeterminadas en superficies y ambientes controlados.

### Objetivos Particulares

1. Seleccionar y construir dos sistemas de locomoción para los móviles que les permita moverse en superficies y ambientes controlados.
2. Diseñar e implementar un control de seguimiento de trayectoria para el robot líder.
3. Diseñar e implementar un control de seguimiento al líder para el robot seguidor.
4. Establecer e implementar un método de comunicación apropiado para la configuración líder-seguidor.
5. Diseñar e implementar un algoritmo para la evasión de obstáculos fijos.
6. Seleccionar e implementar un sistema de sensado en el robot líder, para su propia localización y detección de obstáculos.

## Objetivos

---



7. Seleccionar e implementar un sistema de sensado en el robot seguidor, para la identificación del líder.
8. Diseñar e implementar una GUI para el monitoreo del sistema, la selección de una trayectoria a seguir y delimitar el área de trabajo.

---

## Introducción

---

Los seres humanos siempre hemos buscado la manera de simplificar la ejecución de tareas, por lo que hemos encontrado diferentes soluciones, unas mejores que otras, pero en donde sin duda se destaca la robótica, la cual, ofrece una solución para los problemas que el ser humano desea resolver en diversos escenarios de su cotidianidad. Desafortunadamente no todas las tareas pueden ser realizadas por un solo robot y es ahí, donde surge la robótica cooperativa, proporcionando métodos, teoremas e investigaciones para su desarrollo [25].

La coordinación de robots, en especial el control aplicado a la coordinación, empezó a ser estudiado y aplicado por la comunidad científica, quienes notaron significantes ventajas al implementar un grupo de robots para la realización de tareas [6], como son: la eficiencia a la hora de realizar una tarea (dando como resultado la reducción de costos materiales, económicos, energéticos, etc.), el mejoramiento del desempeño y la robustez; permitiendo realizar tareas como exploración, mantenimiento, inspección, vigilancia, búsqueda de objetos, operaciones de seguridad, construcción de mapas, reconocimiento de terrenos desconocidos o peligrosos, transportación, búsqueda y rescate, entre otras, abriendo paso a un amplio número de aplicaciones desarrolladas en diversos ambientes con la ayuda de diferentes tipos de robots (terrestres, aéreos, espaciales, marinos), según sea el caso. Quedando como única limitante la imaginación humana [20].



Un aspecto que es de vital importancia en la robótica cooperativa es lograr controlar grupos de robots de manera simultánea, ya que estos deben de trabajar de manera sincronizada. Para lograrlo y que los robots se muevan uniformemente, manteniendo una formación es necesario abordar el problema a través de técnicas de control cooperativo, en donde encontramos entre las más conocidas: las *estructuras virtuales*, las configuraciones *líder-seguidor* y las *aproximaciones basadas en comportamientos* [25]. Cada una de estas técnicas ha venido siendo estudiada, y aplicada por diferentes sectores de la sociedad, destacando el sector militar y espacial.

## Antecedentes

### Nacionales

A nivel institucional, en 2017 se llevó a cabo en la UPIITA el trabajo terminal de mecatrónica titulado “*Robot repartidor autónomo*”. Dicho trabajo se desarrolló en ROS (Robotic Operating System) y se ejecutó a través de una tarjeta Nvidia Jetson y un sensor LIDAR para la recabación de datos. El trabajo consiste en un robot capaz de cargar hasta 15 kg y el cual dentro de un sistema de navegación (área de trabajo) genera una trayectoria de manera autónoma con la finalidad de llegar a trayectorias “meta”, transportando cualquier producto que no sobrepase la carga máxima que es capaz de soportar el robot.

A pesar de que este trabajo no comparte ninguna similitud con la robótica cooperativa, es un trabajo de gran ayuda para el desarrollo del proyecto, ya que se implementaron herramientas como odometría, o el algoritmo de Localización Monte Carlo (MCL por sus siglas en inglés *Monte Carlo Localization*) para la ubicación del robot dentro del área de trabajo, al igual que la generación de campos estáticos para su navegación autónoma.

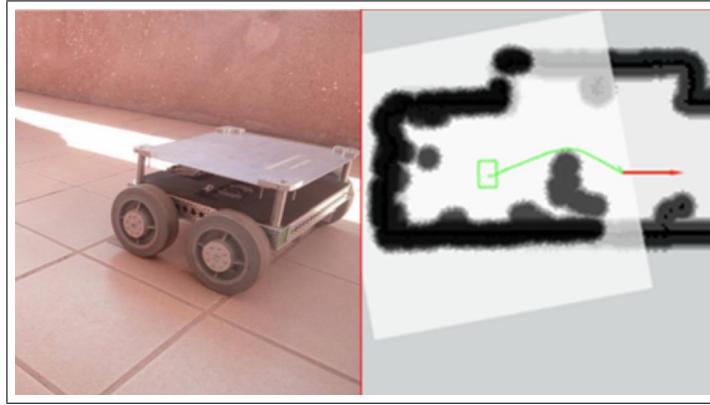


Figura 1: (a) Robot Repartidor Autónomo. (b) Generación de trayectoria [8].

De igual manera, dentro de la UPIITA en 2014, se llevó a cabo el trabajo terminal de mecatrónica titulado “*Sistema de navegación evasor de obstáculos en un robot móvil*”, el cual implementa un robot Turtlebot2 que tiene como objetivo llegar de un punto inicial a un punto final, evadiendo obstáculos estáticos en el camino. En este trabajo se implementan distintos algoritmos de control, como: algoritmo generador de celdas de ocupación probabilística en un mapa 2D, algoritmo de planeamiento global utilizando información 2D del área de trabajo, junto con un algoritmo de planeamiento local reactivo.

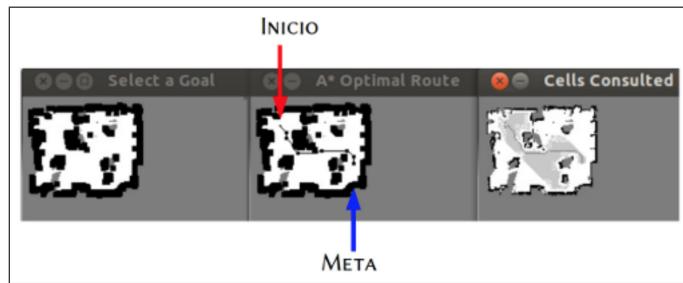


Figura 2: Ejecución del Sistema de Navegación Evasor de Obstáculos implementando un robot Turtlebot2 [18].

Por otra parte, la UNAM en conjunto con el Instituto Tecnológico de Ensenada Baja California desarrollaron en 2013 una investigación que se tituló “*Control visual*



para la formación de robots móviles tipo uniciclo bajo el esquema líder-seguidor”, la cual habla sobre propuesta de un control visual para la formación de robot móviles, considerando una sola cámara fija que observa el espacio de trabajo de los robots y da información sobre los movimientos y las posiciones de los robots, cuya dicha información es compartida tanto para el líder como para el seguidor [6].

## Internacionales

En la Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá, Colombia) en el 2014, llevó a cabo una investigación que se tituló “*Flotilla de robots para trabajos en robótica cooperativa*” la cual habla del diseño de un sistema de control descentralizado, basado en el control líder - seguidor que permite orientar un grupo de robots mientras se desplazan, manteniendo una formación predeterminada [20].

Por parte del IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica) se llevó a cabo un trabajo titulado “*Backstepping based multiple mobile robots formation control*” (formación de múltiples robots móviles basado en el control Backstepping) el cual es un trabajo de investigación acerca del control de formación de múltiples robots móviles, liderados por un robot denominado “líder”, y en el cual se presenta un modelo cinemático para el sistema “líder-seguidor”, haciendo uso de coordenadas cartesianas en lugar de coordenadas polares y tomando la idea del integrador backstepping, derivándose en un control global estable para todo el sistema[42].

La Universidad Politécnica Superior de Elche desarrolló un trabajo de investigación llamado “*Seguimiento de robots mediante visión artificial*”, el cual es un trabajo aplicado al mantenimiento de formaciones y en donde se describe el desarrollo e implementación de algoritmos de navegación que permite a un robot móvil seguir la ruta realizada por otro robot, manteniendo una formación entre ellos. El trabajo implementa diferentes algoritmos de control de movimientos, de manera que el robot que sigue a el líder se mantiene a una distancia (posición y orientación) determinada con respecto a el robot líder[16].

En el Departamento de Ingeniería Electrónica y Ciencia de la Comunicación de La Universidad de California se desarrolló un trabajo de investigación llamado “*Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation*” (Control para la formación de robots móviles no-holonómicos con servo visión omnidireccional y movimiento segmentado) el cual habla de un conjunto de robots móviles omnidireccionales basado en el diseño líder-seguidor usando visión omnidireccional, y en donde se especifica la formación deseada en un plano y esta después es traducida en un control servo visual para cada seguidor. En el trabajo también se muestra que la dinámica de la linealización de retroalimentación del líder-seguidor sufre en consecuencia de las restricciones no holonómicas de los robots y la no-linealidad del modelo [42].

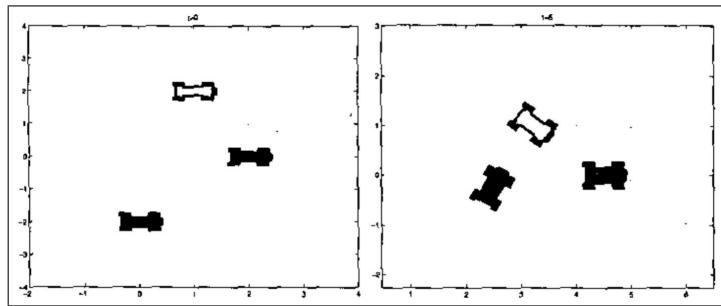


Figura 3: Control de la formación en un plano. Trabajo de investigación de la Universidad de California [42].

## Planteamiento del problema

En el presente trabajo se aborda el desarrollo de un esquema de control *líder-seguidor*, implementado a dos robots móviles terrestres, los cuales tendrán el objetivo de llegar a diferentes puntos o trayectorias dentro de un área de trabajo, evadiendo obstáculos que pudieran haber dentro del escenario de pruebas o en la trayectoria.

La tarea a cumplir por parte del *robot líder* es la de seguir alguna trayectoria pro-



porcionada por el usuario (por medio de una interfaz gráfica) y evadir los obstáculos fijos dentro de un área de trabajo controlada, mientras que la tarea a cumplir por parte del *robot seguidor*, es imitar el comportamiento del líder de manera autónoma.

Todo esto con el objetivo de aportar conocimiento en el rubro de la robótica cooperativa, en especial en la robótica aplicada al control líder-seguidor, con fundamentos en el desarrollo del proyecto SIP 20181591.

## Organización del reporte

El presente trabajo se divide en 6 capítulos principales , que son: *Marco de Referencia, Diseño Conceptual, Diseño Detallado, Integración del Sistema, Análisis de Costos y Conclusiones.*

En el primer capítulo llamado *Marco de Referecia* se fundamenta toda la metodología del diseño del control de los robots móviles y del control líder-seguidor. Se describen las características fundamentales del sistema operativo ROS (*Robotic Operating System*), así como sus librerías AMCL (*Adaptive Monte Carlo Localization*) y VFH (*Vector Field Histogram*), en general se aporta todos los conceptos y teoría previa para realizar el proyecto.

En el segundo capítulo llamado *Diseño Conceptual* se analizan las principales Áreas Funcionales que conforman a cada robot, como los son *Estructura, Procesamiento, Alimentación, Movimiento y Percepción*, y de las cuales se habla de cada una de ellas, explicando su interpretación, necesidad, y requerimiento, al igual que se describe la razón por la cual se escogieron dichas áreas funcionales dentro de los robots móviles y todo lo que conllevan, aplicándoles *tablas de selección* con la finalidad de seleccionar los mejores componentes que conforman cada área.

En el tercer capítulo llamado *Diseño Detallado* se aborda más a fondo cada una de las áreas funcionales junto con cada uno de sus componentes y se dan sus las especificaciones técnicas haciendo la integración de cada área funcional que conforma

el total del sistema. De igual manera, se muestran diagramas de flujo de los distintos algoritmos de control.

En el cuarto capítulo llamado *Integración del Sistema* se habla acerca de la implementación, físicamente todo lo que se ha venido trabajando en los capítulos anteriores y de la misma manera se aborda la integración del sistema por cada área funcional, complementándolo con fotos, gráficas, e imágenes reales del proyecto.

En el capítulo *Análisis de Costos* se lleva a cabo un análisis del costo total de proyecto, partiendo de sus costos fijos y costos variables.

En el sexto y último capítulo *Conclusiones* se detalla los pormenores del proyecto y se explican todos los objetivos que se cumplieron así como de las posibles mejoras y trabajos a futuro.



---

## Marco de referencia

---

### 1.1. Marco teórico

#### 1.1.1. Robots móviles terrestres

Una manera de entender este tipo de robots es por medio de las distintas áreas de conocimiento que se integran para su desarrollo. Lo primero en tomar en cuenta es ¿cómo van a moverse? y ¿qué mecanismo de movimiento usarán? La cinemática, la dinámica y la teoría del control de los mecanismos son necesarias para el desplazamiento correcto de los robots. El diseño e implementación de los sistemas perceptuales robustos, la visión computacional y los sistemas sensoriales, son necesarios para la obtención de la información del entorno y con base en esta información, la toma de decisiones.

De igual manera, es necesario tener conocimientos acerca de localización y navegación que implican los algoritmos informáticos de inteligencia artificial y de la teoría probabilística para el cumplimiento de tareas de manera autónoma.

Todos estos elementos forman el llamado ciclo “*Ve, piensa, actúa*”, tal como se muestra en la Figura 1.1 [38].

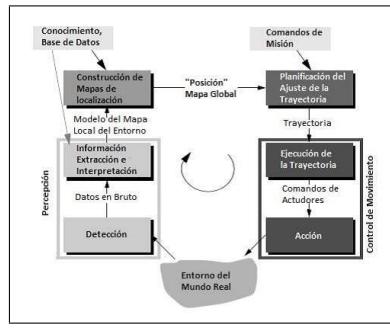


Figura 1.1: *Ciclo: Ve, piensa, actúa.* Componentes que conforman un robot móvil autónomo.

### 1.1.2. Cinemática de robots móviles

El análisis cinemático es esencial para el buen diseño de los robots móviles y para el diseño de controladores, dada cierta configuración de un robot móvil. Para comenzar a entender el movimiento de los robots móviles primero es necesario representar la posición de un robot en un marco de referencia [38].

En la Figura 1.2 la posición de “ $P$ ” en el marco de referencia global se especifica mediante las coordenadas “ $x$ ” y “ $y$ ”, y la diferencia angular entre los marcos de referencia global y local viene dada por “ $\theta$ ”, pudiéndose describir la posición del robot ( $\xi_I$ ) como un vector conformado por estos tres elementos, teniendo en cuenta el uso del subíndice “ $I$ ”, el cual nos indica el marco de referencia global.

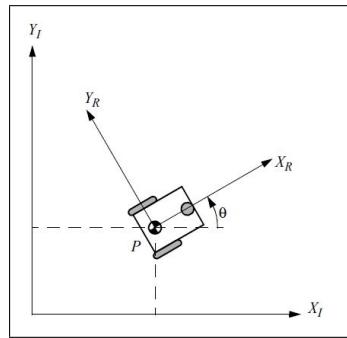


Figura 1.2: Marco de referencia global y el marco de referencia local del robot.



$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$

$\xi_I$  Posición conforme a un marco de referencia  $I$ .

Para describir la cinemática del robot se calcula el movimiento del motor en términos de las componentes del movimiento, recurriendo así a la matriz de rotación ortogonal:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dicha matriz puede ser usada para inspeccionar el movimiento del robot en ambos marcos de referencia, es decir, el uso de esta matriz permite cambiar del marco de referencia local del robot al global y viceversa. Las expresiones para obtener el movimiento conforme a cada marco de referencia son:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta) \dot{\xi}_I$$

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \dot{\xi}_R$$

$\dot{\xi}_R$ : Velocidad conforme al marco de referencia global.

$\dot{\xi}_I$ : Velocidad conforme al marco de referencia del robot.

$R(\theta)^{-1}$ : Inversa de la matriz de rotación.

A su vez  $\dot{\xi}_I$  se compone de las siguientes variables:

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$\dot{x}$ : Velocidad en “ $x$ ” conforme al marco de referencia propuesto.

$\dot{y}$ : Velocidad en “ $y$ ” conforme al marco de referencia propuesto.

$\dot{\theta}$ : Velocidad angular conforme al marco de referencia propuesto.



Estas velocidades se representan en el robot como se indica en la Figura 1.3.

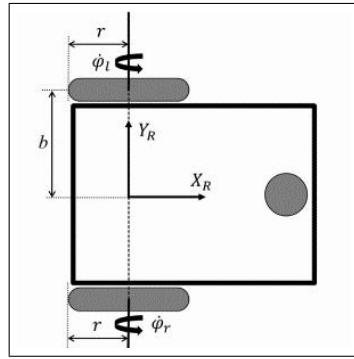


Figura 1.3: Parámetros de una configuración diferencial.

Parte de la cinemática de los robots móviles también es determinar la maniobrabilidad del robot  $\delta_M$ , la cual se compone de la suma del grado de conducción  $\delta_s$  y el grado de movilidad  $\delta_m$ . Para el caso de una configuración diferencial los valores son:

$$\delta_m = 2$$

$$\delta_s = 0$$

$$\delta_M = \delta_m + \delta_s = 2$$

### 1.1.3. AMCL

AMCL es una librería de ROS, la cual hace uso de un sistema de localización probabilístico para un robot, en un entorno de dos dimensiones (2D). Esta librería implementa el enfoque de localización adaptativo de Monte Carlo [40], junto con los siguientes algoritmos.

```

1: Algorithm Augmented_MCL( $\mathcal{X}_{t-1}, u_t, z_t, m$ ):
2:   static  $w_{\text{slow}}, w_{\text{fast}}$ 
3:    $\bar{\mathcal{X}}_t = \mathcal{X}_t = \emptyset$ 
4:   for  $m = 1$  to  $M$  do
5:      $x_t^{[m]} = \text{sample\_motion\_model}(u_t, x_{t-1}^{[m]})$ 
6:      $w_t^{[m]} = \text{measurement\_model}(z_t, x_t^{[m]}, m)$ 
7:      $\mathcal{X}_t = \mathcal{X}_t + \langle x_t^{[m]}, w_t^{[m]} \rangle$ 
8:      $w_{\text{avg}} = w_{\text{avg}} + \frac{1}{M} w_t^{[m]}$ 
9:   endfor
10:   $w_{\text{slow}} = w_{\text{slow}} + \alpha_{\text{slow}}(w_{\text{avg}} - w_{\text{slow}})$ 
11:   $w_{\text{fast}} = w_{\text{fast}} + \alpha_{\text{fast}}(w_{\text{avg}} - w_{\text{fast}})$ 
12:  for  $m = 1$  to  $M$  do
13:    with probability  $\max(0.0, 1.0 - w_{\text{fast}}/w_{\text{slow}})$  do
14:      add random pose to  $\mathcal{X}_t$ 
15:    else
16:      draw  $i \in \{1, \dots, N\}$  with probability  $\propto w_t^{[i]}$ 
17:      add  $x_t^{[i]}$  to  $\mathcal{X}_t$ 
18:    endwith
19:  endfor
20:  return  $\mathcal{X}_t$ 

```

Figura 1.4: Algoritmo AMCL.

De manera general, para un mapa ya establecido este algoritmo estima la *posición* y *orientación* de un robot a medida que este empieza a moverse y usando un *filtrado de partículas* para representar todas las posibles posiciones, en donde, si los datos son confiables y se relacionan con el estado predicho, el *filtrado de partículas* tiende a converger en una posición en particular.

#### 1.1.4. VFH (Vector Field Histogram)

Es un método para la *detección y evasión de obstáculos* sin interferir con el objetivo principal, como el de seguir una trayectoria. El método toma como entrada los datos adquiridos por sensores de tipo láser o ultrasónicos y con base en ello, forma tres niveles de representación de datos; el primero es un mapa de dos dimensiones dividido por celdas donde se guardan las distancias. El segundo es un histograma polar, construido alrededor de la posición momentánea del robot y el tercero es la dirección que debe seguir el robot para llegar a su meta y a su vez evadir un obstáculo si este está cercano.



#### 1.1.4.1. Primer nivel: *Mapa 2D*

De los datos obtenidos por los sensores los cuales son distancias para cada ángulo, se va formando un mapa de celdas o matriz que representa el espacio alrededor del robot, en donde el valor de cada celda es dado por la *ecuación 1.1*.

$$m_{(i,j)} = (c_{(i,j)}^*)^2(a - bd_{(i,j)}^2) \quad (1.1)$$

$c_{(i,j)}^*$ : Valor de certeza en dicha celda

$d_{i,j}$ : Distancia entre la celda  $i, j$  y el centro del vehículo

$a, b$ : Constantes positivas que cumplen  $a - bd_{max} = 0$

Para el cálculo del *valor de certeza* se deben obtener 2 mediciones muy próximas y con ello corroborar si hay un obstáculo en la celda, dándole así, un mayor valor a la celda. Posteriormente las *constantes* se eligen considerando “ $d_{max}$ ” como la distancia mayor a la celda más lejana al robot, obteniéndose “ $a$ ” y “ $b$ ” de manera tal que, la distancia más alejada devuelva un valor de 0 y la distancia más cercana devuelve el valor máximo posible y a su vez se mantenga una relación lineal. Con estas condiciones se tendrá una magnitud para cada celda  $m_{(i,j)}$  que nos indicará la presencia o no de un obstáculo.

#### 1.1.4.2. Segundo nivel: *Histograma polar*

Una vez obtenido el mapa 2D se procede a simplificar estos datos para obtener un histograma polar como el mostrado en la *Figura 1.5*, dando como primer paso la definición de una resolución arbitraria  $\alpha$  de modo que  $n = \frac{360}{\alpha}$ . Posteriormente se definen  $k$  sectores que corresponden a un ángulo discreto  $\rho$  tal que,  $\rho = k\alpha$ , dividiendo así en un cúmulo de datos (*histograma polar*) el cual nos indica la distancia más cercana al objetivo para cada determinados grados (por lo general 5). Para cada sector  $k$ , el histograma polar  $h_k$  es calculado siguiendo la *ecuación 1.2*.

$$h_k = \sum_{i,j} m_{i,j} \quad (1.2)$$

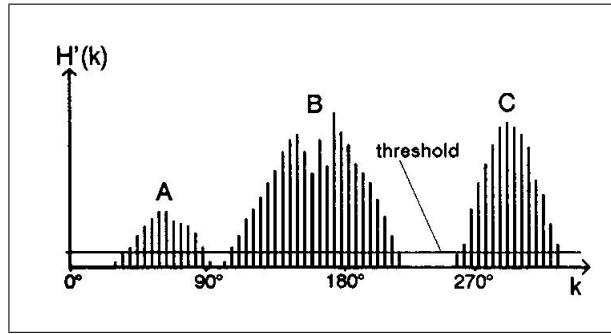


Figura 1.5: Ejemplo de histograma polar.

#### 1.1.4.3. Tercer nivel: *Comando de dirección*

Para el cálculo del comando de dirección se tienen distintas opciones; la primera es, una vez encontradas las aperturas las cuales se definen por los sectores límite  $k_r$  y  $k_l$  y según un umbral  $s_{max}$  (definido por el usuario y la cual depende de la distancia mínima a la que se considera como un obstáculo o como un sector libre) se pueden elegir distintas direcciones por las cuales pasar ya que no hay obstáculos cercanos.

$$c_d = \frac{k_r + k_l}{2} \quad (1.3)$$

$$c_r = k_r + \frac{s_{max}}{2} \quad (1.4)$$

$$c_l = k_l - \frac{s_{max}}{2} \quad (1.5)$$

$$c_t = k_t \text{ si } k_t \in [c_r, c_l] \quad (1.6)$$

Para la *ecuación 1.3* se elige la dirección centrada, para la *ecuación 1.4* se elige la dirección del lado derecho, para la *ecuación 1.5* se elige la dirección del lado izquierdo y para la *ecuación 1.6* con dirección al objetivo.



La segunda opción es definir una función de costo de la siguiente forma y elegir el candidato con menor costo.

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, k_t) + \mu_2 \Delta(c, k_R) + \mu_3 \Delta(c, k_{R-1}) \quad (1.7)$$

Donde  $\mu_k$  son valores positivos y el operador  $\Delta$  representa la diferencia angular entre ambos valores,  $c$  es la dirección candidato,  $k_t$  es la dirección del objetivo y  $k_R$  son las direcciones del robot.

### 1.1.5. Esquemas líder - seguidor

Dentro de la literatura que trata del control bajo un esquema líder-seguidor, se puede dar uno cuenta que la definición del esquema líder-seguidor no es homogénea y depende de cada autor, ya que son muchos los métodos presentados en textos científicos que incluyen las palabras, “líder” y/o “seguidor”, en sus títulos o resúmenes y cada uno de ellos adapta o define bajo sus propios términos y métodos la definición de este esquema. Para exemplificar, a continuación, se presentan dos definiciones de diferentes autores.

1. Uno de los robots es asignado como el *líder* y otro como *seguidor*. El líder sigue una trayectoria predefinida, mientras que los seguidores mantienen una posición y dirección con cierta distancia respecto al líder [21].

Dicha definición es muy parecida a lo que también es conocido como estructuras virtuales [20] dentro de los MRS (por sus siglas en inglés Multi Robot Systems).

Una definición más general y con la posibilidad de complementarla con nuevas ideas es la siguiente:

2. Usando el enfoque *líder - seguidor (LFA)*, un robot actúa como el líder cuyo movimiento define el trayecto para el grupo de seguidores. Todos los seguidores usarán el trayecto definido para alcanzar una meta o lograr una tarea definida [19].



Existen más definiciones con ideas muy similares a las dos anteriores definiciones y que dependiendo del contexto es como implementan su propia definición del esquema líder-seguidor, pero siempre partiendo de la misma premisa en la que un “ente”, debe dictar el comportamiento de “otro u otros entes”.

## 1.2. Marco Procedimental

El *Marco Procedimental* corresponde a los conceptos y técnicas implementadas a lo largo del desarrollo del proyecto, permitiendo de definir e identificar los problemas, acotarlos y visualizarlos de manera sistemática con la finalidad de obtener así elementos fundamentales para la resolución de cada uno de los problemas identificados.

### 1.2.1. Sistema mecatrónico

El concepto de mecatrónica surge en Japón en los años setenta con la siguiente definición:

“*La mecatrónica es la integración sinérgica de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control informático inteligente en el diseño y la fabricación de productos y procesos industriales [13]*”.

Tal definición ha ido evolucionando y generando nuevos métodos de diseño, los cuales han permitido crear productos inteligentes. Actualmente es complicado dar una definición completa de lo que es la mecatrónica, sin embargo, se entiende que la mecatrónica abarca diversas disciplinas de la ingeniería y la cual permite caracterizar los elementos que la componen en: sistemas de modelos físicos, sensores y actuadores, señales, sistemas computacionales, software y adquisición de datos.



### 1.2.2. Diseño mecatrónico

Parte de la identificación de un problema o necesidad es asignar *funciones* necesarias para resolver dichos problemas y asociarlas con las características iniciales con las que se cuentan en la etapa del *Diseño Conceptual*, en la que se analizan diferentes alternativas acerca de cómo satisfacer dichas funciones y en donde también, se evalúan para elegir la mejor alternativa. Posteriormente se formaliza ese concepto en la parte *Diseño Detallado* cuyo objetivo es tener una aproximación bastante cercana del producto final y como se debería construir. Siempre con las validaciones de todas las funciones propuestas.

El diseño mecatrónico no es lineal, sino concurrente y requiere de un desarrollo sistemático y el uso de herramientas modernas de diseño, como lo son según Bishop [4]:

- Herramientas para CAD/CAE.
- Procesos de modelado matemático.
- Simulaciones en tiempo real.
- Simulaciones de hardware en lazo cerrado.
- Prototipado de sistemas de control.

### 1.2.3. Proceso de análisis jerárquico (AHP)

El proceso de análisis jerárquico AHP (*Analytic Hierarchy Process*) es un proceso diseñado e implementado por Thomas L. Saaty [9]. Este proceso de análisis jerárquico está diseñado con la finalidad de resolver problemas complejos con criterios múltiples, en este proceso el diseñador, subjetivamente proporciona evaluaciones respecto a la importancia entre cada criterio considerado y después se realiza una comparación directa entre las alternativas para obtener la mejor propuesta. El resultado de este



procedimiento es una jerarquización que muestra los aspectos más relevantes de cada una de las alternativas, la cual además abre un campo de posibilidades de llevar a cabo el desarrollo e implementación.



---

## Diseño del Sistema

---

### 2.1. Diseño Conceptual

En este capítulo se definen las necesidades y requerimientos del problema planteado, posteriormente el problema se divide en las principales áreas funcionales para resolver el problema y se plantean las diferentes formas de resolver cada una de las funciones donde estas son evaluadas y con base en esta evaluación un concepto final es obtenido.

#### 2.1.1. Necesidades y requerimientos

Es necesario identificar el problema planteado a resolver y extraer todas las necesidades que el cliente tenga. Una vez identificadas dichas necesidades, se prosigue a generar requerimientos los cuales surgen de traducir las necesidades en sentencias cuantificables, para que a partir de ellas se hagan propuestas de diseño las cuales posteriormente son evaluadas. Dado que el enfoque de este trabajo es para investigación, las necesidades no son tan estrictas y son pocas, sin embargo, al hacer una interpretación de estas, surgen muchos requerimientos los cuales permite acotar el proyecto.



Necesidad	Interpretación
Tener dos robots móviles con ruedas para el desarrollo del proyecto SIP.	Selección o construcción de dos robots móviles terrestres para su compra o manufactura, con el objetivo de desarrollar un proyecto de investigación.
Los robots deberán ser usados para futuras aplicaciones y/o proyectos.	Robots con la documentación suficiente para poder ser replicados y reutilizados con una estructura modular, que permitan futuras adaptaciones.
Controlar dos robots móviles terrestres bajo un esquema líder–seguidor.	Coordinación de dos robots móviles bajo la implementación de un esquema de control líder–seguidor.
Los robots deberán evadir obstáculos de manera autónoma y mantener una comunicación continua entre ambos robots.	El robot líder deberá seguir una trayectoria seleccionada y evadir los obstáculos que pudieran estar dentro de la trayectoria, mientras que el robot seguidor deberá alcanzar los mismos puntos que el robot líder con base en la información proporcionada por este último.
Una interfaz humano máquina con la cual se puedan compartir datos del proceso.	Interfaz gráfica que le sea posible iniciar y visualizar el progreso del proceso del control y seguimiento de la trayectoria y la configuración líder–seguidor.

Tabla 2.1: Tabla de Necesidades

Con la interpretación de la *Tabla 2.1* se procede a plantear los requerimientos técnicos enlistados a continuación:

- Control basado en el esquema *líder - seguidor*.
- Móvil terrestre, con ruedas.
- Batería con duración mínima de 10 minutos (uso continuo).
- Estructura estable para el soporte de circuitos y movimiento del robot móvil con la posibilidad de ser adaptada para futuras aplicaciones.



- Material ligero.
- Ambiente controlado (obstáculos fijos y trayectorias predefinidas).
- Superficie lisa y plana.
- Lugar cerrado, con luz controlada.
- Tarjeta de procesamiento de información con arquitectura mínima de 32 bits, con lenguaje de programación de medio/alto nivel (Python, C++).
- Capacidad de soportar procesamiento en paralelo.
- Capacidad para procesar información de distintos sensores y protocolos de comunicación, USB, WIFI,  $I^2C$ .
- Capacidad para adquirir datos confiables.
- Resolución menor a 5cm y  $10^\circ$  o su equivalente en coordenadas rectangulares.
- No susceptibles a ruido de agentes externos.
- Establecer un protocolo de comunicación inalámbrico con suficiente velocidad y alcance para asegurar una buena comunicación entre todos los agentes del sistema.
- Interfaz gráfica de rápido procesamiento capaz de establecer comunicación bidireccional con ambos robots móviles y desplegar los datos transmitidos por los robots.
- El movimiento deberá ser con pausas no mayores a 3s, es decir, la trayectoria deseada deberá fluir lo mejor posible.
- Respuesta rápida de los motores para establecer la velocidad deseada según la salida generada por el sistema de control.



- Establecimiento de algoritmos específicos para la maniobra de evasión de los obstáculos y el control de seguimiento de trayectoria basado en el control líder-seguidor.

Adicionalmente se tienen los siguientes requerimientos administrativos:

- Costo total menor a \$50,000.00 MXN.
- Software de uso libre, para evitar el pago de licencias.
- Componentes fácilmente reemplazables.
- HMI en inglés y español.
- Duración máxima para finalizar el proyecto en 1 año.

### 2.1.2. Descomposición por áreas funcionales

Para tener una comprensión mayor del proyecto se procede a descomponerlo en áreas funcionales como se observa en la *Figura 2.1*, la cual permite la visualización de una tarea complicada, en tareas o funciones más sencillas que contribuyen a resolver el problema principal.

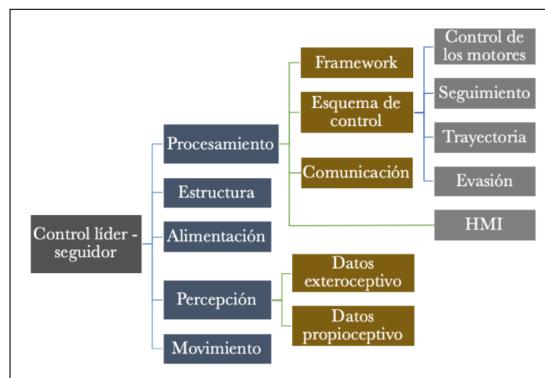


Figura 2.1: Áreas Funcionales propuestas.



### 2.1.2.1. Área Funcional 1: *Estructura*

La primera área de interés es la plataforma o estructura del móvil, donde se albergan todas las herramientas que cumplen con funciones o tareas posteriores. Esta área es la encargada de soportar todos los circuitos, sensores, actuadores, mecanismos de locomoción, fuentes de energía y tarjetas de procesamiento, capaces de satisfacer las necesidades de los robots y en particular del proyecto.

Es importante mencionar que no se realiza algún diseño de esta, sino que, se pretenden analizar las propuestas comerciales existentes o con acceso a un manual para su construcción. La razón es que al estar en el mercado se tiene la certeza que soportan todos los elementos que lleva un móvil, con un proceso de diseño concurrente, una línea de producción, un sistema de pruebas, documentación y al ser comerciales, con costos atractivos.

Dentro de los móviles que se seleccionaron cada uno posee características específicas, aunque similares, y es ahí donde entra la metodología mecatrónica para la selección de la opción más adecuada que se encuentre disponible en el mercado o que tenga la documentación suficiente para construirse, teniendo en cuenta los requerimientos antes mencionados, como el límite de presupuesto.

### 2.1.2.2. Área Funcional 2: *Procesamiento*

La localización, detección y evasión de obstáculos, la comunicación entre robots e interfaz (HMI), el seguimiento de trayectorias, así como la sinergia de las demás áreas funcionales están englobadas en el *Área de Procesamiento* también llamada “*Pensamiento propio del robot*”. El control, en términos de un diagrama IDEF0 es la selección del algoritmo a usar para el cumplimiento de cada una de las funciones, adicionalmente se necesita establecer algún tipo de comunicación (preferentemente inalámbrica) entre ambos móviles y la computadora central, la cual permita al robot seguidor conocer los puntos de interés por alcanzar proporcionados por el robot líder. Así mismo, monitorear diversos parámetros durante la ejecución del programa.



#### **2.1.2.3. Área Funcional 3: *Percepción***

La percepción es el área funcional encargada de la recabación de datos internos y externos de cada robot (datos propioceptivos y exteroceptivos) para posteriormente procesar dicha información y extraer los datos de interés, y así llevar a cabo la localización de los móviles, la detección de los obstáculos, la detección del entorno y la evasión de los obstáculos. Para llevar a cabo la recabación de datos se implementa el uso de dispositivos electrónicos (sensores) capaces de variar sus propiedades internas con base en cambios de magnitudes físicas como distancias y ángulos de los objetos del entorno, aceleraciones y desplazamientos.

#### **2.1.2.4. Área Funcional 4: *Alimentación***

La alimentación es el área funcional encargada de suministrar la energía a cada móvil por lo tanto, es necesario que la fuente de alimentación pueda ser portable y que, a su vez, pueda ser capaz de suministrar una potencia suficiente al móvil, principalmente por los motores que son los que mayor cantidad de energía requieren. Asimismo, al ser portable debe de ser una batería con una capacidad de energía considerable para que los móviles puedan realizar su tarea totalmente sin dejarla a medias o en algún momento interferir con el proceso.

#### **2.1.2.5. Área Funcional 5: *Movimiento***

La parte del movimiento tiene como característica fundamental la elección del tipo de locomoción ya sea Ackerman, triciclo, diferencial, etc. Este tipo de locomoción tiene que estar lo suficientemente documentada para poder satisfacer los requerimientos del proyecto. Otro parámetro importante en esta función, son los actuadores y sus controladores, los cuales son una parte fundamental para lograr tener un funcionamiento adecuado, refiriéndose a la capacidad de transformar los comandos generados por los esquemas de control en acciones que además tengan un control de velocidad y dirección lo suficientemente preciso para asegurar que los



móviles sigan la trayectoria de una manera correcta y consistente.

### 2.1.3. Características y/o necesidades principales de cada área funcional

Ya propuestas las áreas funcionales se procede a enlistar las características y criterios a considerar según las necesidades y requerimientos, haciendo énfasis en los elementos de cada área funcional.

- Percepción del entorno
  - Alta resolución en mediciones.
  - Poco costo computacional.
  - Sensores con largo alcance en sus mediciones.
- Configuración (Configuración y motores)
  - Maniobrabilidad.
  - Facilidad de implementación y mantenimiento.
  - Necesidad de un controlador externo (etapa de potencia).
  - Costo.
  - Consumo energético.
  - Tamaño.
  - Bajo peso.
  - Compatibilidad con diversos tipos de control (Torque, Velocidad, Posición).
  - Cantidad de motores.
- Procesamiento
  - Velocidad de procesamiento.



- Arquitectura.
- Costo.
- Compatibilidad con framework.
- Software/Framework
  - Paralelismo inherente para tareas concurrentes.
  - Herramientas de simulación, visualización de información y desarrollo de interfaces gráficas.
  - Facilidad de programación, física y digital.
  - Compatibilidad con tarjetas de procesamiento.
  - Posibilidad de realizar diagnósticos sobre posibles fallas en el sistema.
- Comunicación
  - Bidireccional.
  - Alta velocidad de transmisión.
  - Costo.
  - Sin necesidad de componentes adicionales a las tarjetas de procesamiento.
- Estructura
  - Modular.
  - Adaptable a diversos sensores.
  - Compacta.
  - Ligera.

#### 2.1.4. Características principales de los robots considerados. ROS-bot, Turtlebot, TX1 “Jet” Robot Kit

Para la selección de los robots móviles se hizo una búsqueda contemplando los criterios antes mencionados, las opciones más relevantes y dentro del presupuesto



son las siguientes tres propuestas. Para cada propuesta se da una breve descripción.

#### 2.1.4.1. Rosbot



Figura 2.2: Robot móvil Rosbot [39].

En la *Figura 2.2* se muestra el *Rosbot* el cual es un robot basado en el sistema operativo ROS (Robotic Operating System) que cuenta con un sensor LIDAR 360° (RPLIDAR A2) y una cámara RGBD. En el procesamiento y control del móvil se utilizan dos unidades centrales de control; la primera es un microcontrolador STM32F4 con instrucciones de un DSP (M4) el cual se encarga del procesamiento de la información proporcionada por los sensores, hacer la retroalimentación de los encoders, guardar en memoria las distancias de los sensores conectados a esta tarjeta y cualquier adquisición que ese necesite en tiempo real. La segunda es un controlador Core2 con Asus tinker Board la cual se encarga de ejecutar el sistema operativo ROS y así poder realizar el procesamiento de todos los algoritmos de alto nivel, asimismo está tarjeta da la posibilidad de comunicarse inalámbricamente con otros dispositivos que ejecuten ROS.

Precio del robot: \$1299.00 USD



#### 2.1.4.2. Turtlebot3 Burger



Figura 2.3: Robot móvil Turtlebot3 Burger [22].

En la *Figura 2.3* se muestra el *Turtlebot3 Burger* el cual es un robot modular de bajo costo y software abierto basado en el sistema operativo ROS. Este robot es el que garantiza mejor compatibilidad con el sistema operativo ROS. Cuenta con dos tarjetas de procesamiento y una interfaz de simulación y monitoreo; la primera de ella es una tarjeta Raspberry Pi 3 modelo B y la segunda es una tarjeta Open CR ARM Cortex 32 bits. Pose un sensor LIDAR 360º (LDS-01), una batería de 1800 mAh, un giroscopio, con un acelerómetro y un magnetómetro de 3 ejes cada uno. Para el control de la posición y velocidad del robot tiene un par motores inteligentes Dynamixel XL430 y una estructura escalable y modular con la cual se pueden extender sus aplicaciones. Uno de los objetivos primordiales del Turtlebot3 Burger es reducir drásticamente el tamaño de la plataforma y bajar el precio sin tener que sacrificar la calidad o limitar sus funciones de respuesta ofertando al mismo tiempo capacidad de expansión (escalabilidad).

Precio del robot: \$549.00 USD



#### 2.1.4.3. TX1 “Jet” Robot Kit

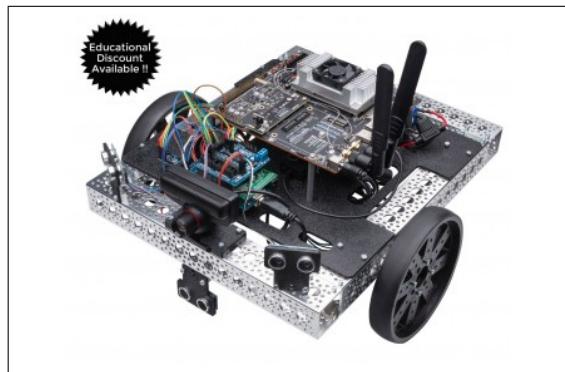


Figura 2.4: Robot móvil TX1 “Jet” [14].

En la *Figura 2.4* se muestra el *TX1 “Jet”* el cual es un robot que utiliza componentes Acobotronics y se basa en la potente plataforma de desarrollo integrada NVIDIA Jetson. El cerebro de Jet se basa en el SoC NVIDIA Tegra® y utiliza los mismos núcleos de computacionales NVIDIA diseñados para las supercomputadoras de todo el mundo. Esto proporciona a la computadora una visión computacional intensiva en cálculos, inteligencia artificial (AI) y capacidades de auto manejo en un paquete de bajo costo. Como “Jet” utiliza el sistema operativo de robot (ROS) para la abstracción, se puede escalar desde proyectos de desarrollo hasta aplicaciones industriales específicas en entornos complejos. El Jetson TX1 es un supercomputador que presenta la nueva arquitectura NVIDIA Maxwell, 256 núcleos NVIDIA CUDA®, CPU de 64 bits y una eficiencia energética competitiva. Sin embargo, no posee tanta flexibilidad estructuralmente hablando para añadir nuevos elementos mecánicos.

Precio del robot: \$1,165.99 USD

#### 2.1.5. Tablas de selección de los robots móviles

Los robots móviles considerados fueron separados acordes a las áreas funcionales antes propuestas y los elementos que componen cada área funcional fueron sometidos



a una comparación directa con el fin de obtener el mejor candidato, dando como resultado las siguientes tablas de selección:

Procesamiento				
	Velocidad del CPU	Compatibilidad con sensores y librerías	Documentación	Total
Rosbot	0.1437	0.2500	0.4000	0.2503
Tb3	0.0747	0.5000	0.3500	0.3136
Jet	0.7816	0.2500	0.2500	0.4361
Ponderación	0.3500	0.4000	0.2500	

Tabla 2.2: Tabla de Selección: Procesamiento.

Percepción				
	Resolución de sensores	Costo de pro- cesamiento	Alcance	Total
Rosbot	0.2857	0.1320	0.5350	0.3672
Tb3	0.57142	0.3396	0.3439	0.4572
Jet	0.1428	0.5283	0.1210	0.1755
Ponderación	0.5	0.1071	0.3928	

Tabla 2.3: Tabla de Selección: Percepción.



Estructura				
	Modular	Adaptabilidad a nuevos sensores	Peso	Total
Rosbot	0.1915	0.2857	0.2857	0.2677
Tb3	0.5957	0.5714	0.5714	0.5761
Jet	0.2128	0.1429	0.1429	0.1562
Ponderación	0.1915	0.2128	0.5957	

Tabla 2.4: Tabla de Selección: Estructura.

Motores y Controladores				
	Corriente Máxima	Modos de ope- ración en el controlador	Torque	total
Rosbot	0.1915	0.2500	0.5000	0.3050
Tb3	0.5957	0.5000	0.2500	0.4525
Jet	0.2128	0.2500	0.2500	0.2426
Ponderación	0.2000	0.5333	0.2667	

Tabla 2.5: Tabla de Selección: Motores y Controladores.

De las tablas de selección se observa que la mejor opción para la mayoría de los casos resultó ser el *Turtlebot3 Burger*, con lo que se concluye con la parte de selección de los robots móviles. En algunos casos no fue necesaria la realización de tablas ya que poseían las mismas características, como : configuración, framework y comunicación (para mayor detalle de cómo se obtuvieron los anteriores valores consultar los anexos).



### **2.1.6. Criterios para el diseño y selecciones de interfaces gráficas**

#### **2.1.6.1. Criterios a evaluar**

Para llevar a cabo la implementación de la interfaz gráfica se decidió primero considerar sus requerimientos técnicos y necesidades, posteriormente para lograr una correcta realización de la interfaz se investigaron diferentes criterios para una interfaz gráfica dentro de los cuales se seleccionaron los más importantes. Estos criterios para el diseño y selección de interfaces gráficas son mencionados a continuación.

#### **2.1.6.2. *Amabilidad***

La amabilidad se refiere a la facilidad de uso, aunque, dicho parámetro es relativo de acuerdo con el tipo de usuario, se considera que una interfaz es amigable cuando es más fácil de usar para un mayor número de una población objetivo.

#### **2.1.6.3. *Interactividad***

Una interfaz es interactiva cuando le proporciona al usuario un sentido de comunicación deseado, en otras palabras, al usuario le será fácil plasmar su idea o propósito en la interfaz sin limitaciones.

#### **2.1.6.4. *Redundancia óptima en el proceso de comunicación***

Eficiencia a la hora de comunicarse entre distintos modos de comunicación como pueden ser visuales, verbales, auditivos, entre otros.

#### **2.1.6.5. *Eficiencia y utilidad***

El objetivo principal de una interfaz gráfica es hacer que las ideas, los conocimientos y la información sean comprensibles y útiles.

### 2.1.6.6. Tabla de Criterios

Criterios	Peso	Parámetro	Opción 1			Opción 2			Opción 3			Opción 4		
			M	C	V	M	C	V	M	C	V	M	C	V
Amabilidad	0.3	Facilidad de uso		9	2.7		8	2.4		6	1.8		5	1.5
Interactividad	0.2	Sentido de comunicación deseado		9	1.8		8	1.6		4	0.8		5	1
Redundancia óptima en el proceso de comunicación	0.1	Integración de distintos modos de comunicación		8	0.8		7	0.7		6	0.6		7	0.7
Eficiencia y Utilidad	0.4	Información comprensible y útil		9	3.6		9	3.6		8	3.2		8	3.2
			8.9			8.3			6.4			6.4		

Tabla 2.6: Tabla de Selección de las diferentes opciones de interfaz.



#### 2.1.6.7. Lista de opciones de interfaz

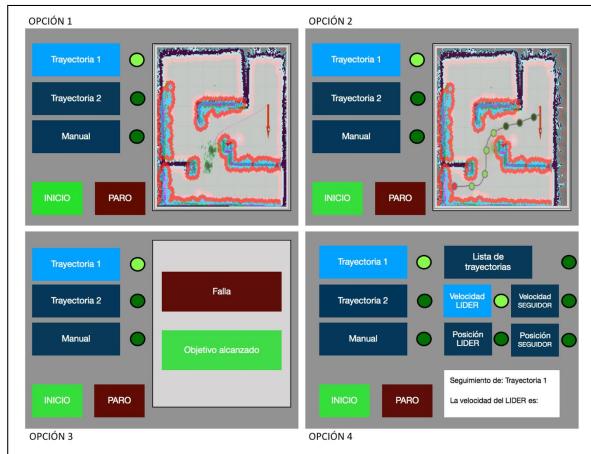


Figura 2.5: Opciones de interfaces gráficas

#### 2.1.6.8. Diseño de arquitectura general del software

Como parte del diseño conceptual también se contemplan las distintas arquitecturas usadas en este tipo de proyectos, donde existen dos o más elementos comunicados y capaces de realizar procesos o tomar decisiones. Los tipos de arquitectura pueden ser:

- Centralizado.
- Distribuido.
- Descentralizado.
- Una combinación entre los anteriores.

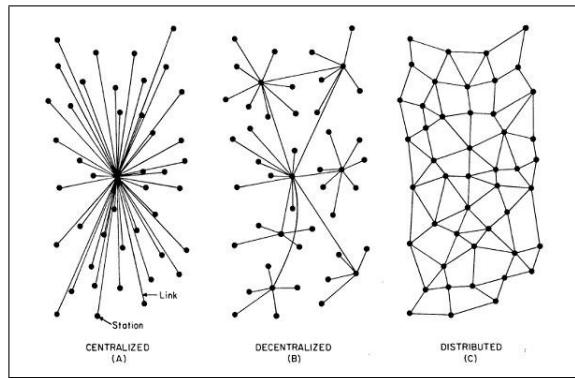


Figura 2.6: Tipos de Arquitecturas

A continuación, en la *Tabla 2.7* se mencionan las ventajas y desventajas de cada uno de estos paradigmas.

	Centralizado	Descentralizado	Distribuido
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil de implementar.</li> <li>■ Un solo servidor.</li> <li>■ Difícil escalar.</li> <li>■ Un solo punto de falla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No hay una sola autoridad.</li> <li>■ Todos los nodos son iguales en la red en términos de autoridad.</li> <li>■ No importa si algunos nodos son suprimidos, el sistema sigue funcionando.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sistemas distribuidos, con poder de cómputo a través de los múltiples nodos, en lugar de 1.</li> </ul>

Tabla 2.7: Comparación entre Arquitecturas



Sin embargo, para el caso en particular, donde solamente interactúan 2 robots y una computadora únicamente para dar inicio a las trayectorias y modos de operación, las ventajas y desventajas que ofrecen estos paradigmas no se logran apreciar o reflejar completamente debido a la escala del proyecto y número de robots.

En la propuesta de solución y adaptándose a los robots móviles seleccionados, una opción adecuada es aplicar una arquitectura distribuida como se muestra en la *Figura 2.7*, ya que con este paradigma se realiza el procesamiento en cada uno de los robots móviles, así como en la computadora de monitoreo. Cada elemento dentro del sistema procesará partes de código específicas, relacionadas con sus acciones de manera autónoma sin necesidad de consultar todas sus acciones con un nodo central.

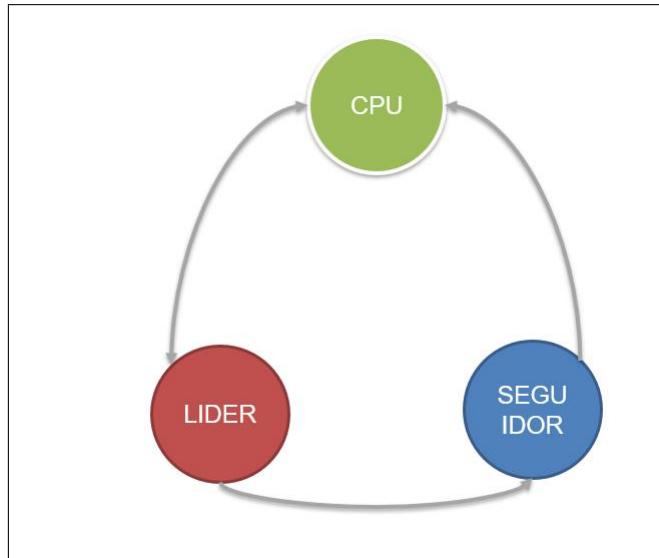


Figura 2.7: Arquitectura de software propuesta para el proyecto

Adicionalmente cada robot móvil tiene a su vez distintos nodos ejecutándose para cumplir con sus funciones específicas las cuales se detallan en la *Sección 2.2 “Diseño Detallado”*.



### 2.1.6.9. Concepto Final

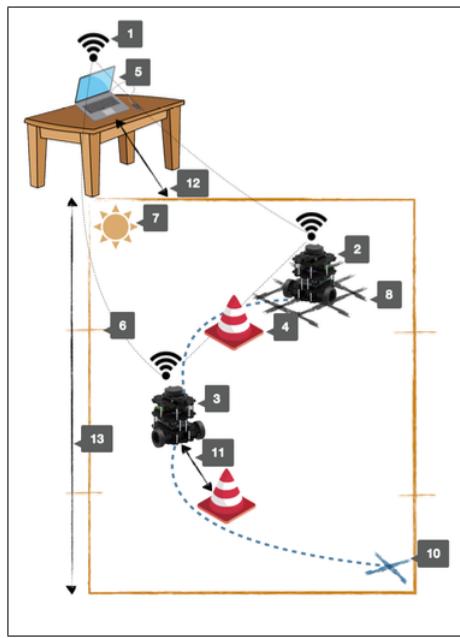


Figura 2.8: Concepto final

1. Comunicación WiFi entre la interfaz humano máquina y los robots líder y seguidor.
2. Robot Seguidor con sensores LIDAR y acelerómetro.
3. Robot Líder manipulado directamente desde la interfaz.
4. 2 obstáculos con forma regular de dimensiones cercanas a la de una caja de zapatos.
5. Computadora con la interfaz y sistema operativo ROS para comunicarse con los robots.
6. Marcas de distintas formas para una mejor identificación con el sensor LIDAR.
7. Ambiente de luz controlado favorable para la operación del sensor LIDAR.



8. Suelo plano sin ningún objeto móvil y con coeficiente de fricción mayor a 0.4.
9. Trayectoria fijada por medio de la interfaz la cual sigue tanto el líder como el seguidor.
10. Punto de objetivo propuesto por el usuario (la trayectoria llega a puntos meta).
11. Distancia mínima de separación entre los objetos o móviles de al menos 10 cm.
12. Cercanía entre la computadora y el área de prueba de no más de 2 metros.
13. Dimensiones del área de trabajo no mayores a 6 metros X 6 metros.



## 2.2. Diseño Detallado

En este capítulo se analiza más a profundidad cada una de las áreas funcionales previamente analizadas junto con las características y datos técnicos de cada uno de los elementos que conforman las distintas áreas funcionales. De igual manera, se aborda la integración de cada una de las áreas funcionales con el sistema final que conforman a los robots, tal y como se puede observar en la *Figura 2.9*.

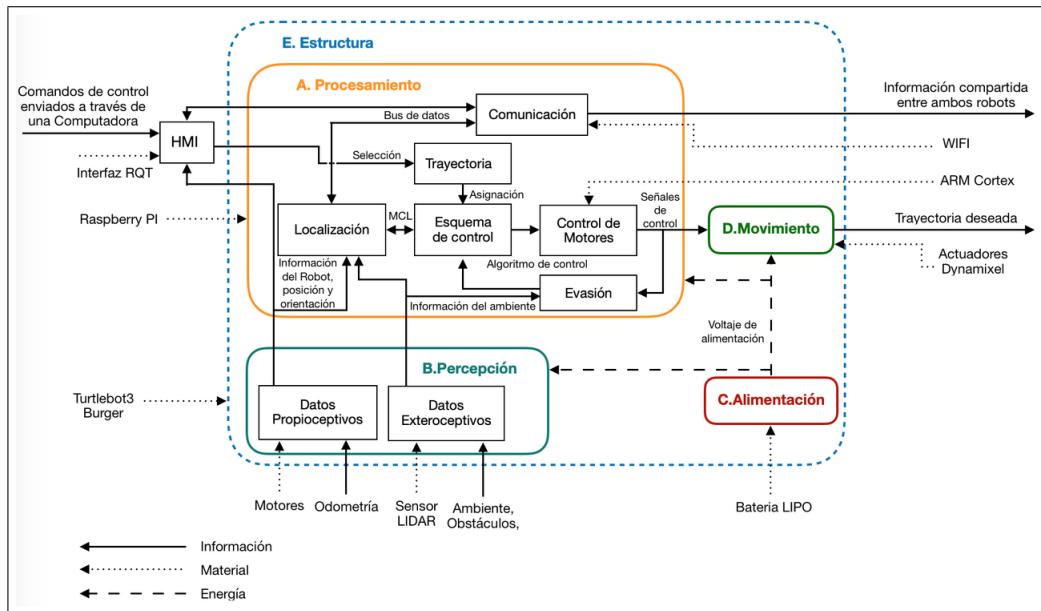


Figura 2.9: Integración de todas las Áreas Funcionales.

La *Figura 2.9* muestra la interacción de las distintas áreas funcionales aplicadas a cada uno de los robots, así como su implementación con los distintos componentes los cuales en conjunto forman a los robots que se utilizan para llevar a cabo la coordinación, navegación y ejecución de tareas proporcionadas por un usuario.

Ajustándose a la Figura 2.9 la primera área funcional que hay que analizar es la de *Estructura* que tiene como principal objetivo albergar los distintos componentes que conforman a los robots, es decir, es la encargada de alojar todas las partes físicas de las distintas áreas funcionales pertinentes a los robots, como por ejemplo, en el



caso del *Procesamiento*, se necesita que dentro de la estructura exista un lugar donde establecer y resguardar las tarjetas de procesamiento (*Raspberry PI y ARM Cortex*) y que estas estén seguras para que no sufran ningún desperfecto que se pudiera traducir en algún error en los robots.

### 2.2.1. Área Funcional 1: *Estructura (Soporte de componentes)*

La Estructura está directamente relacionada con el tamaño y el peso de las distintas piezas que conforman los robots, así como el tipo de locomoción, en donde, los robots móviles TurtleBot3 Burger se acoplan perfectamente a estas necesidades y previos requisitos ya antes mencionados, gracias a que cuentan con una estructura modular y compacta que hace posible la distribución de los distintos componentes del robot a través de sus diferentes plataformas y cuya estructura es capaz de soportar hasta 15 kg de peso quedando libres 14kg para futuras aplicaciones. Asimismo cabe mencionar que la estructura en conjunto con la batería LiPo y el sensor LIDAR es de apenas 1 kg [28] [32] [3].

Por otro lado, al tener una estructura modular dentro del robot, y estando clasificado el TurtleBot3 Burger como un robot móvil de *Código Abierto* con flexibilidad en el diseño mecánico, se puede adaptar a cualquier tipo de locomoción, aunque cabe mencionar que el desarrollo del proyecto se lleva a cabo en la configuración original con la que vienen integrados los robots, que es de tipo diferencial y de la cual en la sección de *Movimiento* se habla a detalle.

#### 2.2.1.1. Elementos primordiales de la estructura

##### Chapas

Los pisos o chapas que conforman los diferentes niveles del TurtleBot3 dentro de la estructura, son como se muestran en la *Figura 2.10*, los cuales están fabricados de plástico ABS y tienen distintos orificios que sirven para ahorrar material y con ello peso. Por otra parte, sirven para adaptar diferentes componentes, haciendo los pisos



de la estructura universales para cualquier requerimiento, adaptación o aplicación.

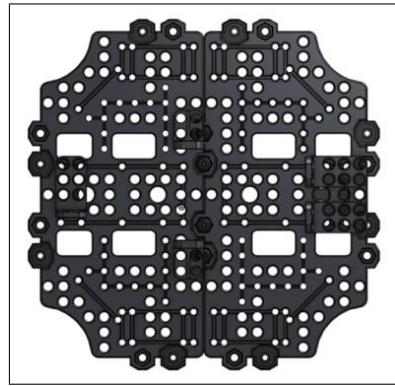


Figura 2.10: Ensamble de 2 pisos o chapas en forma de celda (base estructural).

Al ser un robot denominado multiplataforma o multicapa como se observa en la *Figura 2.11*, ofrece entre otras bondades un mejor uso del espacio y mejor manejabilidad a la hora de ensamblar los componentes que conforman al robot. Cuenta con 4 plataformas las cuales distribuyen los distintos componentes en cada una de estas, y sus chapas o pisos en forma de celdas permiten la colocación y posterior implementación de diferentes componentes y funciones, de acuerdo con la tarea que sea requerida por el robot.

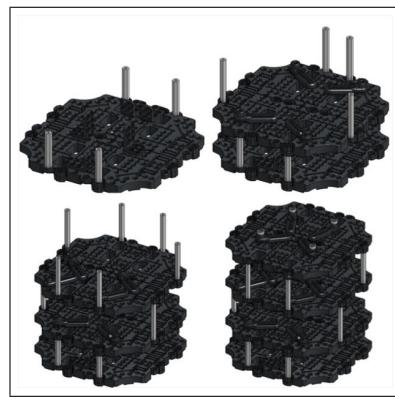


Figura 2.11: Estructura tipo multiplataforma.



### 2.2.1.2. Elementos utilizados en cada piso

#### Elementos generales

Para el ensamblaje de cada piso de la estructura, se utilizan los siguientes elementos:

- Dos chapas tipo “waffle” (*ver Figura 2.10*).
- 16 tornillos M3 de 4mm de longitud.
- 16 tuercas M3 de 8mm de longitud.

Se colocan 4 tornillos M3 de 8mm en la parte superior de la chapa, y por la parte inferior para ajustar se usan 4 tuercas M3 como se muestra en la *Figura 2.11*.

#### Elementos específicos por cada piso

##### 1. Piso 1

- a) 2 Chapas tipo “waffle”.
- b) 8 Tornillos de 4 mm de longitud.
- c) 4 Tornillos de 6 mm de longitud.
- d) 8 Tornillos de 12 mm de longitud.
- e) 8 Tornillos de 8 mm de longitud.
- f) 4 Tuercas.
- g) 4 Soportes de 35 mm de longitud.
- h) 2 Motores DYNAMIXEL (XL430).
- i) 2 Cables DYNAMIXEL a OpenCR.
- j) 1 Rueda loca.
- k) 2 Llantas.
- l) 2 Bandas.
- m) 1 batería Li-Po.



n) 10 Remaches.

ñ) 5 Ménsulas.

## 2. Piso 2

a) 2 Chapas tipo “waffle”.

b) 4 Tornillos de 8 mm de longitud.

c) 8 Tornillos de 12 mm de longitud.

d) 12 Tornillos de 8 mm de longitud.

e) 4 Soportes de 45 mm de longitud.

f) 4 Remaches.

g) 5 Ménsulas.

h) 4 Soportes de PCB.

i) 4 Tuercas.

j) 1 Tarjeta OpenCR1.0.

k) 1 Cable de batería Li-Po.

## 3. Piso 3

a) 2 Chapas tipo “waffle”.

b) 8 Tornillos de 8 mm de longitud.

c) 12 Tornillos M3 de 8 mm de longitud.

d) 2 Remaches.

e) 8 Tuercas M2.5.

f) 4 Tuercas M3.

g) 6 Soportes M3 de 45 mm de longitud.

h) 1 Conector usb a lds.

i) 4 Soportes de PCB.



j) 1 Cable de alimentación Raspberry Pi 3.

k) 2 Cables usb a micro-usb.

l) 1 Chapa adaptadora.

m) 1 Tarjeta Raspberry Pi 3.

#### 4. Piso 4

a) 2 Chapas tipo “waffle”.

b) 4 Tornillos M2.5 de 8 mm de longitud.

c) 4 Tornillos M2.5 de 16 mm de longitud.

d) 10 Tornillos M3 de 8 mm de longitud.

e) 4 Espaciadores.

f) 8 Tuercas M2.5.

g) 4 Tuercas M3.

h) 4 Soportes de PCB.

i) 1 Sensor LIDAR.



### 2.2.1.3. Dimensiones

Como ya se ha mencionado el *TurtleBot3 burger*, es un robot compacto con apenas una longitud (L) de 138 mm, una anchura (W) de 178 mm y una altura (H) de 192 mm tomando como referencia las llantas, tal como se muestra en la *Figura 2.12*.

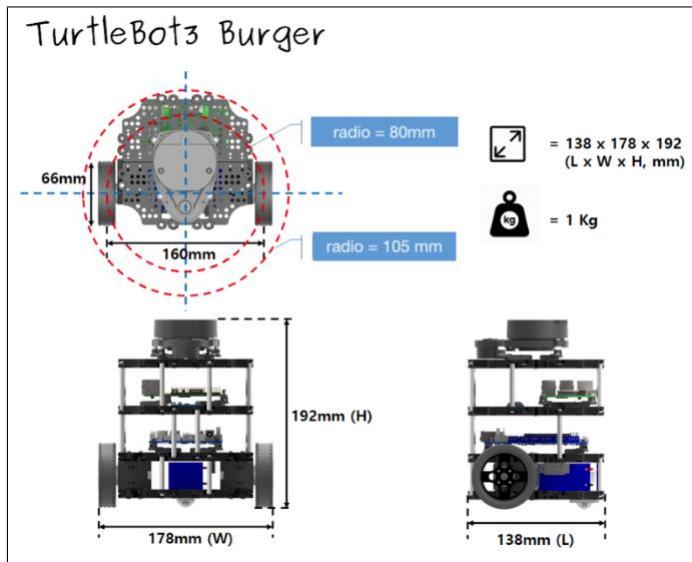


Figura 2.12: Dimensiones del Turtlebot3 [32].

### 2.2.2. Área Funcional 2: *Procesamiento (Comunicación de componentes)*

El *Procesamiento* es de suma importancia de acuerdo con el diagrama de la integración de las distintas áreas funcionales (*ver la Figura 2.1*), puesto que además de ser el área funcional con el mayor número de subáreas, es una de las partes principales donde recae todo el desarrollo del esquema de control líder - seguidor.

El desarrollo de esta área funcional se dividió en tres secciones con el objetivo de volver más detallado el proceso de diseño. La primera parte consiste en la *descripción de las tarjetas encargadas del procesamiento*, en donde se mencionan las distintas tarjetas y sus características más relevantes, es decir se define el recurso disponible para realizar el procesamiento.



En la segunda parte se *definen las funciones que deberán cumplir cada una de las tarjetas*, y finalmente en la tercera parte se *describe como se propone cumplir dichas funciones*.

#### **2.2.2.1. Primera parte: *Dispositivos destinados para el procesamiento***

Recordando el ciclo “*Ve, piensa, actúa*”, el procesamiento funciona como la parte del pensar, y es a través de este pensar que los robots pueden ejecutar las acciones que el procesamiento solicite. Son cuatro los dispositivos donde existe o se lleva a cabo el procesamiento.

1. Líder: Raspberry Pi 3 Model B.
2. Líder: OpenCR.
3. Seguidor: Raspberry Pi 3 Model B.
4. Seguidor: OpenCR.
5. Computadora de monitoreo.

Las características técnicas más relevantes de cada una de las tarjetas se muestran en las *Tablas 2.8* y *2.11*.

Elemento	Características
Microcontrolador	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. STM32F746ZGT6 / 32-bit ARM Cortex-M7 con FPU (216MHz, 462DMIPS).</li> </ul>
Sensores	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Giroscopio 3 ejes.</li> <li>2. Acelerómetro 3 ejes.</li> <li>3. Magnetómetro 3 ejes (MPU9250).</li> </ul>
Programador	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. ARM Cortex 10 pines JTAG/SWD conector serial USB.</li> <li>2. Dispositivo de Actualización de Firmware (Device Firmware Upgrade - DFU).</li> </ul>
Digitales I/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 32 pines (L 14, R 18) con conectividad a la interfaz Arduino.</li> <li>2. Dispositivo de Actualización de Firmware (Device Firmware Upgrade - DFU).</li> <li>3. 5 pines OLLO x 4.</li> <li>4. GPIO x 18 pines.</li> <li>5. PWM x 6.</li> <li>6. I2C x 1.</li> <li>7. SPI x 1. UPIITA</li> </ul>
Ing. Mecatrónica	41

Tabla 2.8: Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte A [34]



Elemento	Características
Entradas analógicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 6 canales de Convertidores Analógicos - Digitales de 12 bits de resolución.</li> </ul>
Puertos de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. USB x 1 (Micro-B USB connector/USB 2.0/Host/Peripheral/OTG).</li> <li>2. TTL x 3 (B3B-EH-A / Dynamixel).</li> <li>3. RS485 x 3 (B4B-EH-A / Dynamixel).</li> <li>4. CAN x 1 (20010WS-04).</li> </ul>
Botones y LEDs	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. LD2 (rojo/verde) : comunicación USB.</li> <li>2. LED de usuario x 4 : LD3 (rojo), LD4 (verde), LD5 (azul).</li> <li>3. Botón de usuario x 2.</li> </ul>

Tabla 2.9: Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte B [34].

Elemento	Características
Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Fuente de entrada externa.</li> <li>2. 5 V (USB VBUS), 7-24 V (Batería o SMPS).</li> <li>3. Batería por defecto: LiPo 11.1V 1,800mAh 19.98Wh.</li> <li>4. SMPS por defecto: 12V 5A.</li> <li>5. Fuente de salida externa.</li> <li>6. 12V max 5A(SMW250-02), 5V max 4A(5267-02A), 3.3V@800mA(20010WS-02).</li> <li>7. Puerto de batería externa para el reloj de tiempo real (RTC Real Time Clock) (Molex 53047-0210).</li> <li>8. LED de encendido: LD1 (red, 3.3 V encendido).</li> <li>9. Botón de reinicio x 1 (para reset de la tarjeta).</li> <li>10. Botón de encendido o apagado x 1.</li> </ul>
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 105(W) X 75(D) mm.</li> </ul>
Masa	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. 60 gramos.</li> </ul>

Tabla 2.10: Características de la Tarjeta ARM Cortex M7 parte C [34].

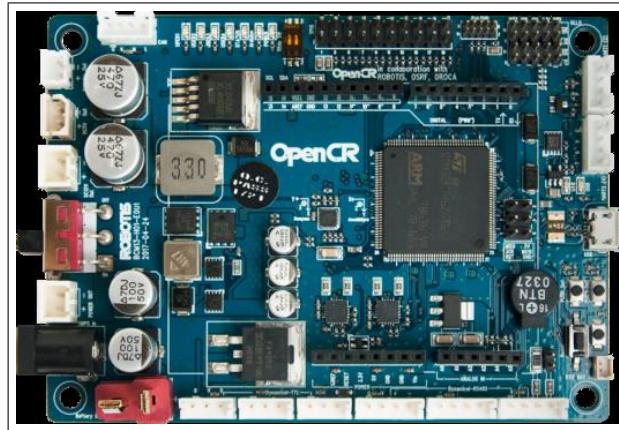


Figura 2.13: Tarjeta ARM Cortex M7 [34].

Características
Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
1GB RAM
BCM43438 wireless LAN y Bluetooth Low Energy (BLE)
Puerto Ethernet
40-pin GPIO para expansión
4 puertos USB 2.0
Salida de audio de 4 polos y puerto de video compositivo
HDMI
Puerto para Raspberry Pi camera
DSI display para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi
Puerto Micro SD para el sistema operativo
Fuente de poder Micro USB hasta 2.5 A

Tabla 2.11: Características de la tarjeta Raspberry Pi 3, Modelo B [31].

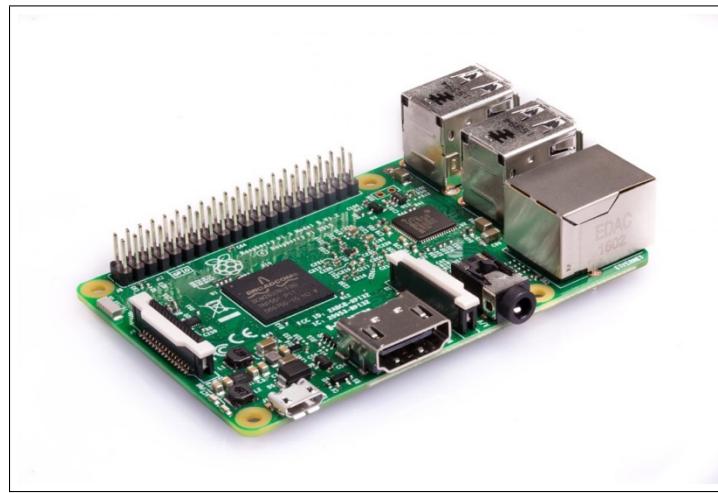


Figura 2.14: Tarjeta Raspberry PI 3, Modelo B [31].

#### 2.2.2.2. Segunda parte: *Funciones a desarrollar en cada tarjeta*

Una vez definidos los elementos necesarios, sigue preguntarse ¿qué realizarán? Es decir, que áreas funcionales están relacionadas con las tarjetas de procesamiento y de que se encargan dichas áreas funcionales. El procesamiento es la principal área funcional, pero de ella se derivan las siguientes subáreas, las cuales se recuperan del diseño conceptual:

**Framework:** Es una herramienta de software que se ejecuta en cada una de las unidades de procesamiento para facilitar ciertos aspectos como; la manera en la que se procesan los datos y el funcionamiento del sistema en general.

**Esquemas de control:** Son los encargados de definir la dirección de los robots para mantener la trayectoria deseada, el esquema líder-seguidor y la evasión de obstáculos. Esta a su vez se divide en seguimiento de trayectoria, seguimiento al líder, evasión de obstáculos y control de motores.

**Comunicación:** Es la encargada de transmitir mensajes entre los distintos agentes.

Estas áreas funcionales estarán distribuidas en cada una de las tarjetas, siguiendo



la lista a continuación.

- RBP Líder.
  - Seguimiento de trayectoria.
  - Evasión de obstáculos.
- Open CR Líder.
  - Control de motores.
- RBP Seguidor.
  - Seguimiento al líder.
- Open CR Seguidor.
  - Control de motores.

Ya clarificadas las funciones específicas de cada una de las tarjetas, el siguiente paso es definir “¿cómo se cumplirán?”.

#### 2.2.2.3. Tercera parte: *Diseño del software*

**Seguimiento de trayectorias** Para el seguimiento de trayectorias se ha optado por seleccionar la *Matriz de fuerzas* (mapa de vectores que cubre toda el área del lugar) [3], como método de seguimiento por donde el líder se desplaza. El algoritmo probabilístico llamado *AMCL* permite conocer la posición de los robots con una incertidumbre de  $2.5cm^2$ , facilitando el uso de la matriz de fuerzas, ya que una vez determinadas las dimensiones del área de pruebas se procede a definir la trayectoria a seguir por el líder, esto se hace discretizando la trayectoria propuesta y enlistando dichos puntos en un archivo con extensión .txt. Posteriormente, esta serie de puntos son procesados por el algoritmo que genera la matriz de fuerzas como se muestra en la *Figura 2.15* y es guardado en un archivo con extensión .npy el cual puede ser



fácilmente leído e interpretado por Python. En la *Figura 2.16* se observa el algoritmo usado en el programa principal para generar la matriz de fuerza y en la *Figura 2.17* se muestra cómo se calcula para cada punto de la matriz el elemento destino o meta.

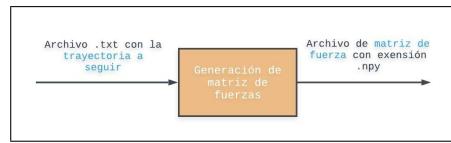


Figura 2.15: Entrada y salida del programa que genera la matriz de fuerza.

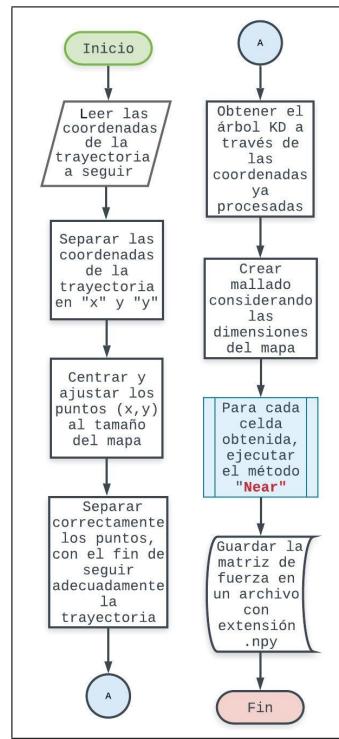


Figura 2.16: Algoritmo Generador de la Matriz de Fuerza.

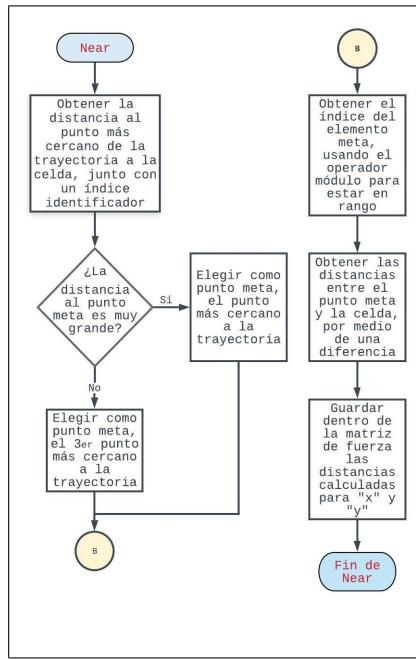


Figura 2.17: Diagrama de Flujo para la rutina “Obtener el punto meta”.

Una vez obtenida la matriz de fuerza se debe implementar un código para que el líder pueda seguir dicha trayectoria. La implementación del seguimiento de trayectoria se realiza en el nodo “MovimientoLíder”. En la *Figura 2.18* se muestra el diagrama UML planteado para este nodo, asimismo en las *Figuras 2.19, 2.20, 2.21, 2.22* y *2.23* se muestran los diagramas de flujo que explican la funcionalidad de los métodos de la clase propuesta.

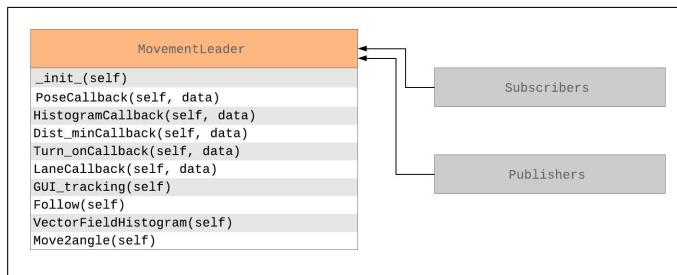


Figura 2.18: Diagrama UML del objeto *MovementLeader* a implementar en el nodo del líder.



En la *Figura 2.19* se observa el programa principal del nodo encargado de asignarle el movimiento al líder, este programa al construir el objeto crea las variables para publicadores y subscriptores que se mencionan en el Diagrama UML de la *Figura 2.18*, y además configura todas las condiciones y funciones a ejecutar. Como acción principal, este programa ejecuta el método “Follow”, brindando de la capacidad de movimiento a los robots, en caso de ser necesario.

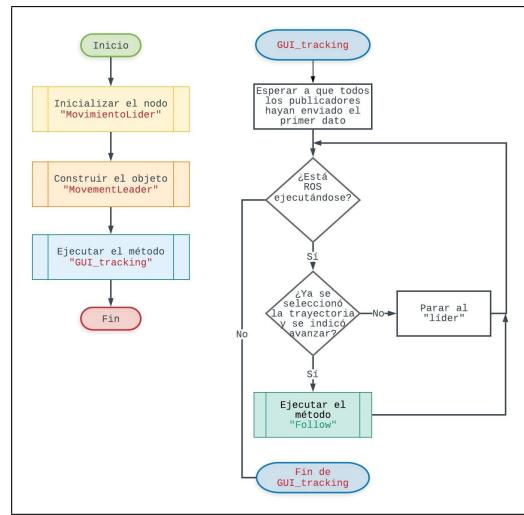


Figura 2.19: Diagrama de flujo del programa principal del nodo del líder.

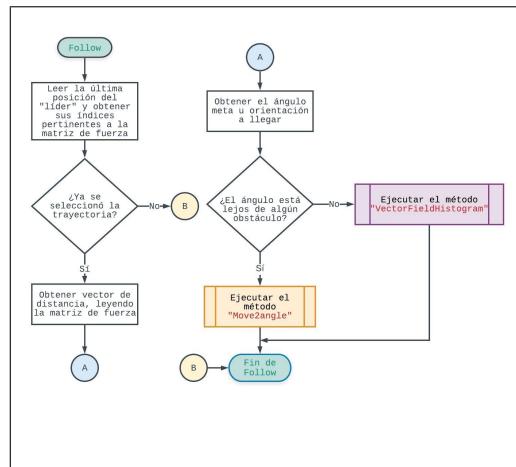


Figura 2.20: Diagrama de flujo del método “Follow”.



En la *Figura 2.20* se muestra el diagrama de flujo del método “*Follow*”, el cual tiene como propósito principal decidir si ejecuta el seguimiento de trayectoria o esquiva algún obstáculo cercano en caso de tenerlo. Adicionalmente incluye controles sobre la trayectoria seleccionada.

En la *Figura 2.21* se muestra el diagrama de flujo del método “*Vector Field Histogram*”, para su ejecución en el líder. Esta es la segunda parte del algoritmo donde ya se cuenta con el histograma generado. Este método tiene como función encontrar el ángulo más cercano a la trayectoria por donde pueda pasar el móvil sin chocar, y para ello encuentra el primer ángulo libre (más cercano a la trayectoria) donde se sabe que no hay obstáculo y se propone como dirección a llegar u objetivo.

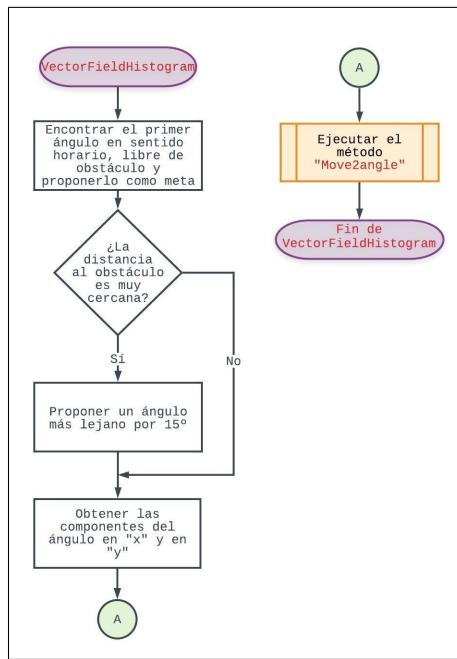


Figura 2.21: Diagrama de flujo del método “*VectorFieldHistogram*”.

En la *Figura 2.22* se muestra el diagrama de flujo del método “*Move2angle*”, el cual, a partir de la dirección a seguir, ya sea la que se da directamente del seguimiento de la trayectoria o a partir del VFH (en caso de tener un obstáculo cercano), orienta al robot líder al ángulo meta por medio del control de su velocidad angular. Cabe

mencionar que para realizar un mejor seguimiento cuando el móvil está desorientado por más de  $45^\circ$ , la velocidad lineal es cero para garantizar la rotación en su propio eje, lo cual reduce el error al tener una mejor maniobrabilidad.

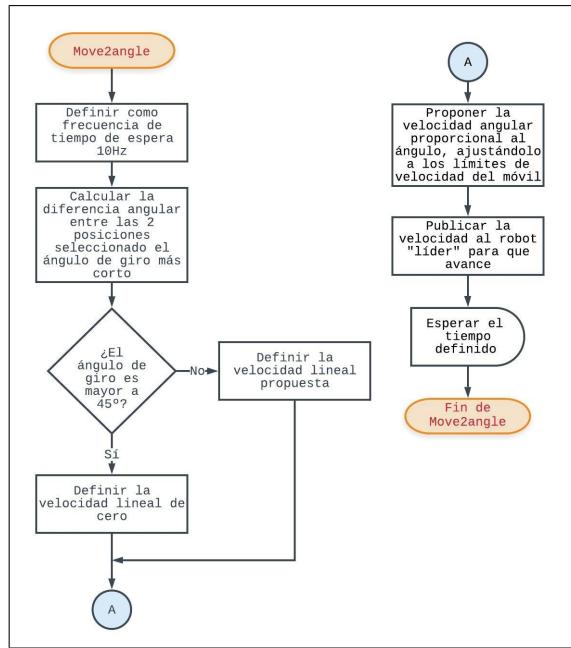


Figura 2.22: Diagrama de flujo del método “Move to angle”.

En la *Figura 2.23* se muestra los diagramas de flujo de los “Callbacks”, los cuales son métodos que interrumpen la ejecución del programa principal cada vez que se recibe un dato de los publicadores. El objetivo general de los callbacks es recibir y guardar datos como variables globales para que posteriormente puedan ser utilizados. En el caso específico del *histograma*, recibe un vector indicando si hay obstáculo o no, con el cual el método de “Follow” da la instrucción de seguir la trayectoria o esquivar el obstáculo. Para evitar que una variable no esté actualizada, se prende una bandera que indica que ya fue recibido al menos un dato.

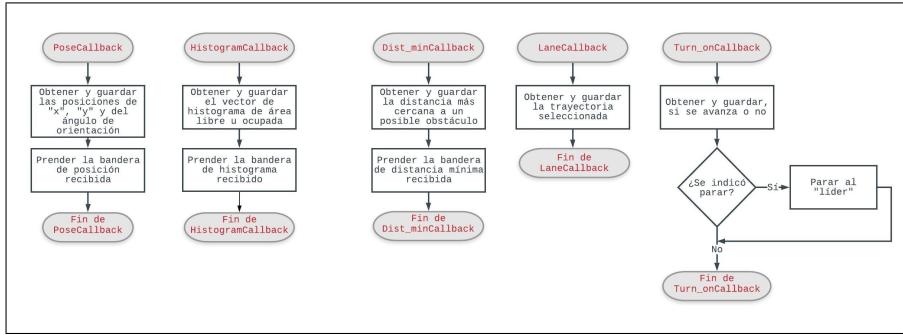


Figura 2.23: Diagrama de flujo de los “Callbacks”.

Este nodo es el encargado de suscribirse al algoritmo AMCL y con base a ello, reorientarse para mantener la trayectoria junto con la ayuda de la matriz de fuerza.

**Esquema Líder - Seguidor** El implementar uno de los esquemas de control líder - seguidor propuestos en el Marco de referencia, implica mantener una posición relativa al robot líder ( $d_1$ ) pudiendo ocasionar colisiones entre ambos robots o entre los obstáculos. Para este caso en particular, el robot seguidor más que mantener una posición relativa al robot líder, debe mantenerse sobre la trayectoria dictada por el líder, es decir, para evitar que pueda existir una colisión y lograr que el robot seguidor se mantenga en la ruta, se debe mantener una velocidad lineal constante e igual para cada robot, enviando y almacenando los puntos ruta por los que el robot líder pase. Con dichos puntos de ruta, el robot seguidor usa el mismo principio que usa el robot líder para reorientarse.

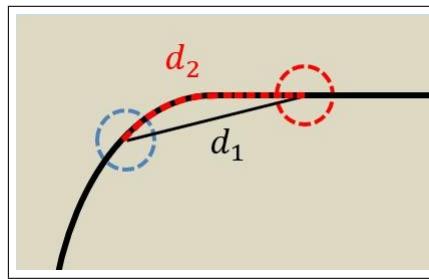


Figura 2.24: Representación de las distancias entre el líder y el seguidor.



En la *Figura 2.24* se tiene al robot líder (color rojo) y al robot seguidor (color azul), la curva de color negro representa un tramo de la trayectoria a seguir, la cual está formada por  $P_n(x_n, y_n)$ , siendo  $P_l$  la coordenada donde se localiza el robot líder y  $P_s$  donde se localiza el robot seguidor, definiendo  $d_1$  y  $d_2$  en las *ecuaciones 2.1* y *2.2*, de la siguiente manera.

$$d_1 = \sqrt{(x_l - x_n)^2 + (y_l - y_n)^2} \quad (2.1)$$

$$d_2 = \sum_{\substack{P_l=x_{l-1}, y_{l-1} \\ P_n=x_n, y_n}} = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \quad (2.2)$$

La distancia  $d_1$  es únicamente la distancia entre líder y seguidor, mientras que  $d_2$  es la distancia que separa al líder del seguidor, sobre la trayectoria.

Una vez definido el tipo de esquema líder-seguidor usado, se procede al diseño del algoritmo que cumpla lo propuesto “*Nodo Seguidor*”.

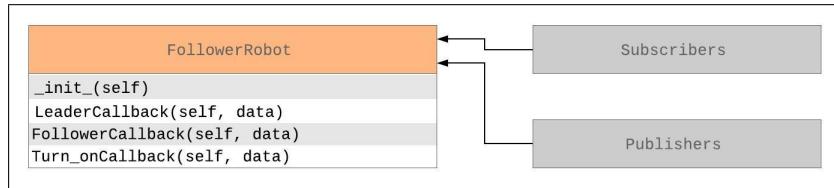


Figura 2.25: Diagrama UML del objeto *FollowerRobot* a implementar en el nodo seguidor.

Dicho nodo se suscribe a las posiciones publicadas por el líder y las posiciones del seguidor en la construcción del objeto “*FollowerRobot*”, como se muestra en la *Figura 2.26*. Cada vez que se recibe una nueva posición del líder, esta es almacenada en una lista de Python llamada *WPL* mostrada en la *Figura 2.27*. En la *Figura 2.27* se muestran los Callbacks del nodo del seguidor, obteniendo la posición del robot líder para después almacenarla en la lista WPL (LeaderCallback) y en la instrucción de avanzar (Turn\_onCallback).

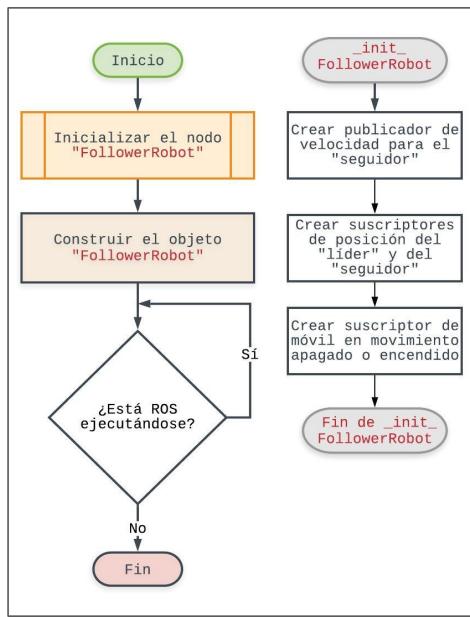


Figura 2.26: Diagrama de flujo del programa principal del nodo seguidor.

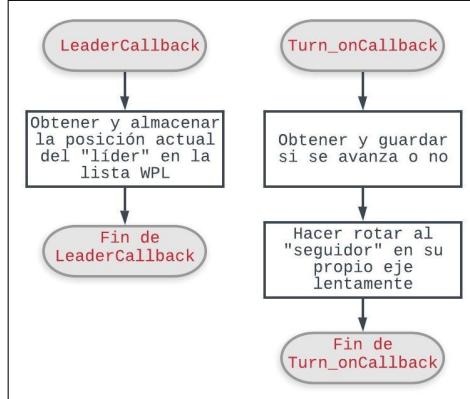


Figura 2.27: Diagrama de flujo de los Callbacks para obtención de datos.

El método *FollowerCallback* mostrado en la *Figura 2.28*, es utilizado por parte del robot seguidor para cubrir los mismos puntos alcanzados por parte del robot líder, reorientando al robot seguidor bajo el mismo lazo de control implementado en el líder, y en función de la posición y la lista con los puntos de referencia almacenados en la lista WPL.

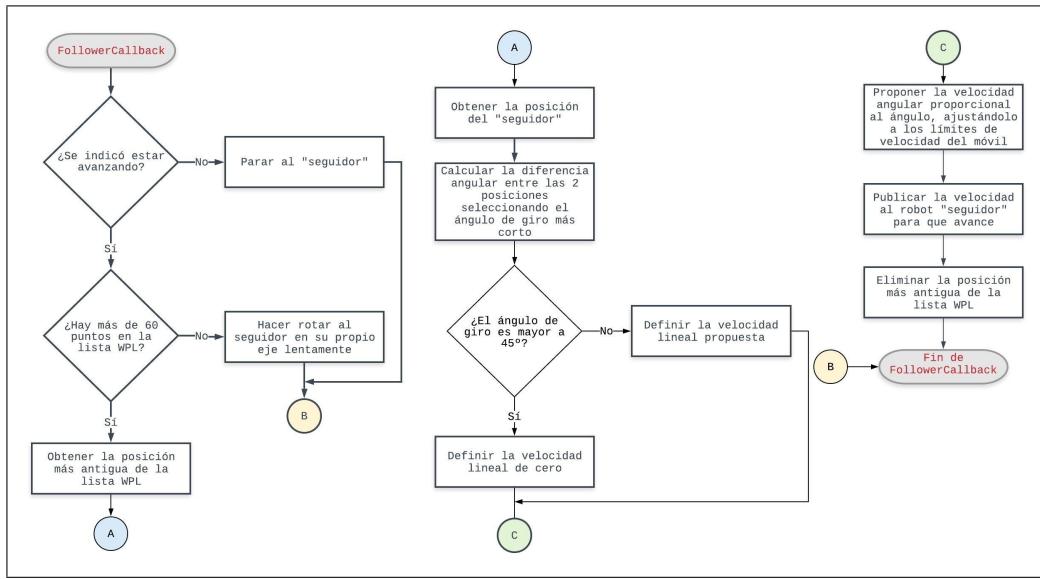


Figura 2.28: Diagrama de flujo del método FollowerCallback.

**Evasión de obstáculos** Para la evasión de obstáculos es necesario un método que se ajuste con la forma de operar de la Matriz de fuerza, por lo que se cuenta con dos posibilidades; *algoritmo por campos potenciales* y *VFH*. De Ribeiro en Evasión de Obstáculos se tiene un análisis de los pros y contras de los distintos algoritmos para la evasión de obstáculos [24]. Basado en ese estudio se elige el *VFH*, ya que es un algoritmo que requiere un menor costo computacional, no afecta de manera brusca el seguimiento de trayectoria y no se corre el riesgo de dejar al robot dentro de un mínimo local, como sucede con los campos potenciales.

La manera de implementar el *VFH* es dividiendo el algoritmo en dos nodos; el primer nodo es el de la *Distancia mínima* mostrado en la Figura 2.29, el cual tiene como único objetivo calcular y enviar la distancia entre el robot líder y cualquier obstáculo que tenga enfrente o al lado. El segundo es el nodo llamado *LaserVFH*, mostrado en la Figura 2.32, tiene como propósito generar un histograma polar binario en el cual se muestren los ángulos de donde hay y no hay obstáculo, dado un cierto umbral que después es mandado al nodo del robot líder. Como se puede observar en



el nodo del líder en la función “*Follow*”, en la primera parte se decide si aplica VFH o seguimiento de trayectoria considerando la distancia mínima a cualquier obstáculo. En la segunda parte se aplica el VFH para encontrar el ángulo libre más cercano al ángulo dado por la trayectoria, gracias al histograma binario proporcionado por el nodo *LaserVFH*.

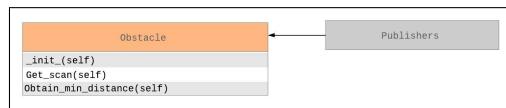


Figura 2.29: Diagrama UML para nodo de distancia mínima.

El nodo de distancia mínima en su función principal mostrada en la *Figura 2.30*, inicializa al nodo con su publicador de “distancia mínima” y además configura los límites de error debido a que en ciertas ocasiones el LIDAR entrega valores muy pequeños que no concuerdan con la distancia real entre los robots y los objetos muy cercanos, por lo cual la distancia debe ser mayor al radio de la estructura de los robots, ya que al no considerar este efecto, generaría que la distancia mínima siempre fuera de 0 y nunca se avanzaría. Por último, el constructor ejecuta el método “*Obtain\_min\_distance*” con el que se logra obtener la distancia mínima entre todos los ángulos frontales y laterales del robot.

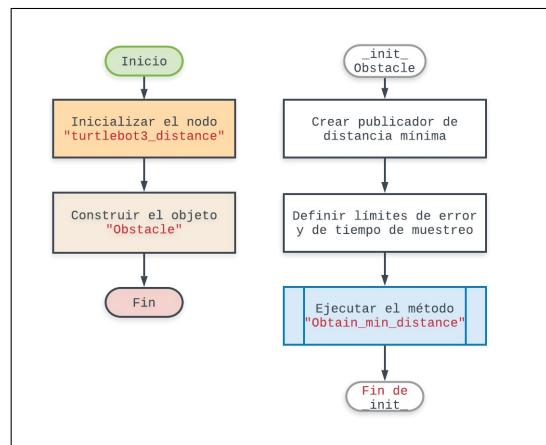


Figura 2.30: Diagrama de flujo del programa principal del nodo de distancia mínima.



Profundizando más en la obtención de la distancia mínima, en la *Figura 2.31* se muestra el diagrama de flujo de cómo se obtiene la distancia mínima, comenzando por verificar primero si ROS se está ejecutando de manera correcta para después proseguir con el programa, posteriormente se guarda en una lista todos los valores de las distancias de donde el robot líder pudiera chocar con un objeto (considerando que este siempre avanza hacia enfrente), y por último, se calcula el valor mínimo de la lista y este es publicado para que sea recibido en el nodo del robot líder.

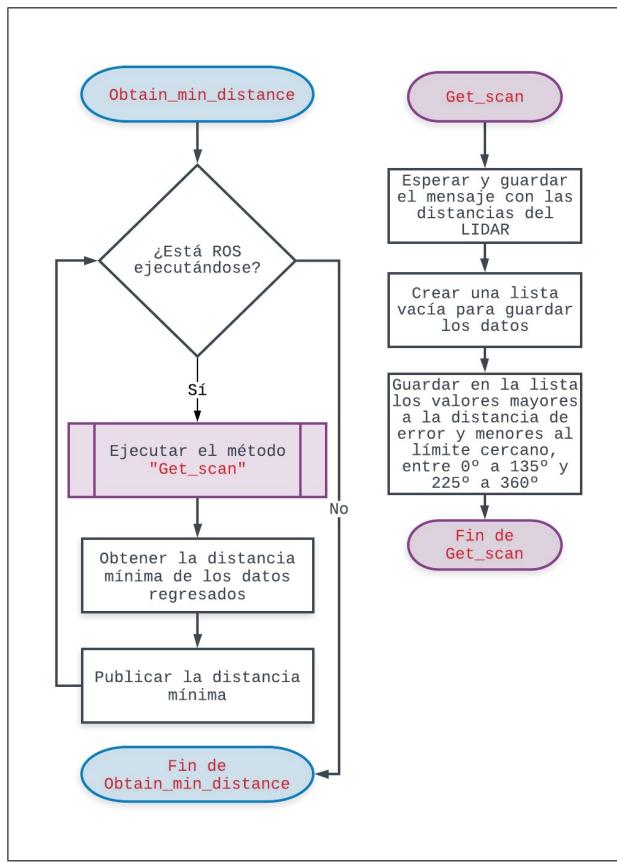


Figura 2.31: Diagrama de flujo método para obtener la distancia mínima al obstáculo.

Centrándose más en el diseño del algoritmo “*Vector Field Histogram*”, el algoritmo se distribuye en 2 partes; la primera parte consiste en la obtención del histograma binario a partir de las distancias dictadas por el LIDAR y su orientación, las cu-



les son mostradas en un diagrama UML y en un programa principal en las *Figuras 2.32 y 2.33*. La segunda parte consiste en usar el histograma binario para evadir el obstáculo, tal y como se explica en el nodo del líder.

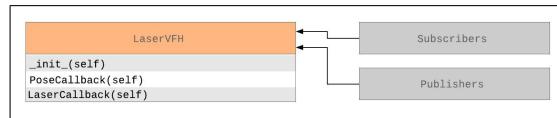


Figura 2.32: Diagrama UML para nodo LaserVFH.

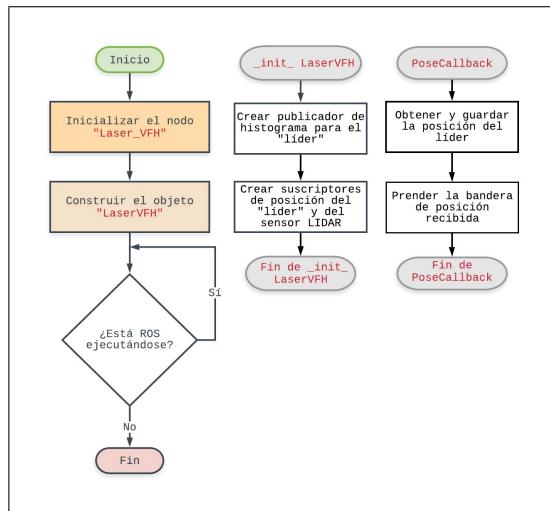


Figura 2.33: Diagrama de flujo del programa principal del nodo LaserVFH.

Para generar el histograma binario se aplica el proceso mostrado en la *Figura 2.34* donde, a partir del histograma de distancias proporcionado por el LIDAR y la orientación del líder, se genera un histograma binario base, acoplado al marco de referencia global sobre el cual está la trayectoria. Considerando así la orientación del líder para reorientar los ángulos del LIDAR que se obtienen conforme al marco de referencia del líder y un umbral de distancia a la cual se le considera ángulo libre u ocupado. Posteriormente, con el fin de ensanchar este histograma binario (debido a que el móvil no es una partícula sino un cuerpo rígido), se calculan los puntos del histograma donde existen flancos de subida o flancos de bajada, obteniendo así los



valles y las crestas. A partir de estos ángulos se ensancha el histograma quitando “N” ángulos libres iniciando en cada cresta o valle (“N” se acostumbra desde 20 hasta 35). Por último, se envía el histograma ensanchado al nodo del líder.

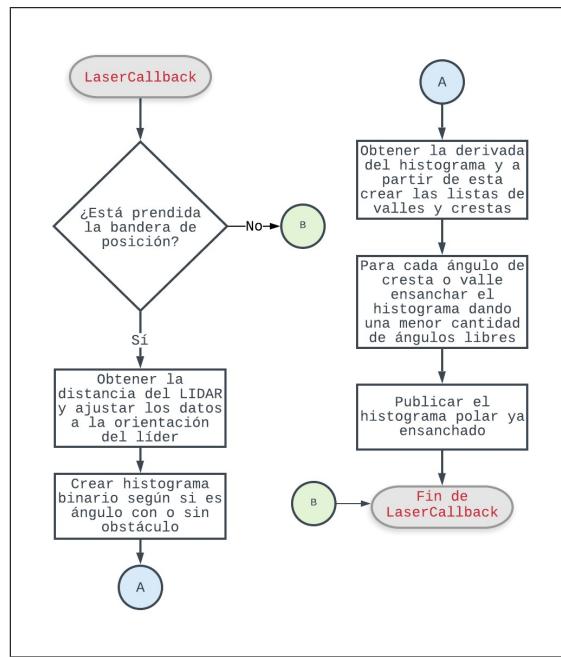


Figura 2.34: Diagrama de flujo para generar histograma binario.

**Comunicación** La comunicación se realiza por medio de WiFi entre los distintos dispositivos, es decir, el robot líder, el robot seguidor y la computadora de monitoreo, tienen una comunicación continua. Como se explicó en la parte del diseño conceptual; la arquitectura para el desarrollo de este proyecto es de tipo distribuida, ya que cada dispositivo antes mencionado, procesa distintos tipos de información y realiza diversas tareas, que para un sistema centralizado teóricamente sería complicado y demandante computacionalmente, mientras que, para esta arquitectura, el procesamiento de información se distribuye y reduce la demanda de poder computacional para un dispositivo en particular.



Los mensajes que son transferidos vía WiFi, son los tópicos publicados durante la ejecución del esquema líder - seguidor. A continuación, se presenta una lista de ellos y la información que contienen.

- */map*
- */tb3<sub>0</sub>/Histogram*
- */tb3<sub>0</sub>/amcl\_pose*
- */tb3<sub>0</sub>/cmd\_vel*
- */tb3<sub>0</sub>/odom*
- */tb3<sub>0</sub>/scan*
- */tb3<sub>1</sub>/amcl\_pose*
- */tb3<sub>1</sub>/cmd\_vel*
- */tb3<sub>1</sub>/odom*
- */tb3<sub>1</sub>/scan*

Para poder enlazar estos mensajes de comunicación con los robots, es necesario establecer una comunicación WiFi entre los distintos robots y la computadora de monitoreo. A continuación, se muestra cómo hacerlo.

Se obtiene la IP de la PC remota y se modifica en la computadora del TurtleBot3 Burger.

- Ingresar el siguiente comando en cada Turtlebot 3 burger y PC remota >>  
`$nano /.bashrc`
- Modificar la dirección de localhost en *ROS\_MASTER\_URI* y *ROS\_HOSTNAME* con la dirección IP obtenida de la ventana de terminal anterior.



```

source /opt/ros/kinetic/setup.bash
source ~/catkin_ws/devel/setup.bash

export ROS_MASTER_URI=http://192.168.0.100:11311
export ROS_HOSTNAME=192.168.0.100

```

Figura 2.35: Configuración de la IP para la comunicación vía WiFi [22].



Figura 2.36: Ejemplo de configuración WIFI [30].

**Control de motores** Para lograr que los robots móviles se comporten como se desea, es necesario hacer uso de la cinemática inversa de su configuración (estas ecuaciones fueron planteadas en el Marco teórico). El enfoque es hacia el cálculo de la velocidad necesaria en cada una de las llantas para obtener así, el cambio en la dirección y mantener una velocidad lineal constante en todo momento, como se explica a continuación.

Lo primero es considerar la *velocidad lineal* a la que se desean que vayan los robots ( $V_k$ ) y la velocidad máxima ( $V_{max}$ ). Tomando la ecuación de la cinemática inversa, obtenemos las ecuaciones 2.3 y 2.4 para la velocidad en ambos motores de los robots.



$$\phi'_r = \frac{V_k + \theta' b}{r} \quad (2.3)$$

$$\phi'_l = \frac{V_k - \theta' b}{r} \quad (2.4)$$

Debido a la restricción de velocidad máxima de los motores ( $\phi'_{max}$ ), el máximo en la velocidad angular que se puede obtener, se representa en la *ecuación 2.5*.

$$\theta' = \frac{\phi'_{max} r - V_k}{b} \quad (2.5)$$

Las *ecuaciones 2.3, 2.4, 2.5*, son las implementadas por la librería que usa ROS para controlar a los robots.

### 2.2.3. Área Funcional 3: *Percepción (Comunicación entorno - robot)*

Como se puede observar en la *Figura 2.9* de la página 33, la tercera área funcional a analizar es la de *Percepción*, la cual tiene la función de adquirir los datos propioceptivos y exteroceptivos de cada uno de los robots, es decir, la recabación de datos como la distancia, velocidad y posición de los robots, con el fin de poder ubicar a los robots, implementando odometría (*información proprioceptiva*), o llevando a cabo la recabación de la información del ambiente dentro del área de trabajo (*información exteroceptiva*).

Para la recabación de la *información proprioceptiva* es necesario un control preciso de los actuadores, con el objetivo de lograr orientar de manera correcta a los robots, y en conjunto con una buena lectura de los datos (obtenidos de la rotación de las ruedas), llevar a cabo una estimación más precisa de la posición de los robots durante la navegación.



### 2.2.3.1. Datos propioceptivos

Este tipo de datos son obtenidos a partir de variables internas de los robots, es decir, su medición es únicamente referente a variables internas cuantificables, como lo son; la medición de la batería, la medición de una señal proporcionada por un encoder en un actuador, etc. La principal ventaja que los sensores proprioceptivos tienen es que no dependen de estímulos externos por su característica de medir únicamente los datos o variables referentes a los estados internos del robot, sin embargo, por esta misma característica es difícil obtener datos en concreto confiables, siendo por lo tanto, una desventaja el *nivel de error total almacenado o acumulado*, pudiéndose estimar con un muestreo de los sensores, pero si nunca llegar a tener el valor verdadero.

### 2.2.3.2. Encoders rotatorios

En robótica, los encoders se utilizan habitualmente para llevar a cabo tareas odométricas, las cuales permiten estimar la posición de un robot móvil con respecto a una posición inicial conocida, basándose en el número de revoluciones de cada rueda del robot, y en la dirección en las que estas se mueven. Los encoders más empleados son los rotatorios (o de eje), que son dispositivos electromecánicos que convierten la posición angular de un eje en un código digital. Los encoders pueden ser magnéticos, mecánicos y de otros tipos, aunque los más comunes son los ópticos.

### 2.2.3.3. Encoder óptico rotatorio de tipo relativo o incremental

Este tipo de encoder está formado por un disco con agujeros (o ranuras) cerca de su borde, el número de agujeros en el disco determina la precisión del encoder y este es colocado de modo tal que el eje del disco coincida con el eje del motor y el de la rueda (que normalmente son el mismo). A un lado del disco se coloca un led infrarrojo, mientras que al otro lado y enfrente del led infrarrojo, se coloca un fototransistor receptor de infrarrojos. Cuando el disco gira, los agujeros hacen que



el fototransistor reciba luz de manera intermitente, generándose así una secuencia de pulsos. Se acostumbra a tener un par de leds que midan ranuras desfasadas 90 grados, cada una con una configuración como se describió anteriormente, con el fin de conocer el sentido de giro del motor y así poder calcular mediante un sistema relativo la posición del motor sin conocer la posición inicial. A pesar de que se puede programar mediante una técnica de interrupciones o leyendo constantemente la lectura del giro, una forma económica y fácil de obtener es mediante un flip-flop D, con una señal conectada a la entrada de reloj y la otra, a la entrada de datos. Al ser 2 señales cuadradas desfasadas 90 grados cuando detecta un cambio de estado en el pin de reloj, actualiza con el dato del segundo, el cual por su construcción coincide siempre con el giro (1 - sentido horario, 0 - sentido antihorario).

#### 2.2.3.4. Encoder óptico absoluto

Los encoders ópticos absolutos están formados por patrones codificados de zonas opacas y transparentes y suelen ser más apropiados para casos en los que se producen rotaciones más lentas, o poco frecuentes, como por ejemplo la averiguación de la rotación de un volante en un vehículo automatizado. El funcionamiento es similar al de los encoders relativos, pero en lugar de utilizarse un único led y un único foto receptor, se utilizan varios, tal y como se muestra en la *Figura 2.37*. Por medio de estos sensores se obtiene la posición absoluta sin necesidad de ningún cálculo como ocurre con el relativo, además de conocerse siempre su posición inicial, su tiempo de respuesta no es tan alto como en el relativo y su construcción es más compleja y al tenerse más señales.

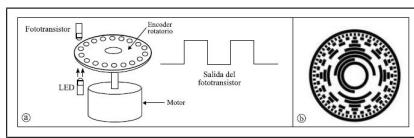


Figura 2.37: Funcionamiento del encoder absoluto.



### 2.2.3.5. Acelerómetros

Los acelerómetros son dispositivos que detectan cambios en la velocidad. La mayoría no están preparados para medir velocidad constante, sino que únicamente miden aceleración o desaceleración. En un principio estaban restringidos al ámbito científico e industrial debido a su alto coste, sin embargo, gracias a su abaratamiento, cada vez se encuentran más presentes en aparatos de uso cotidiano, como ordenadores portátiles (que se suspenden en caso de caídas), mandos de consolas de videojuegos, o incluso teléfonos móviles.

Dentro de la robótica, uno de los principales usos de un acelerómetro es la detección de movimiento. Los acelerómetros presentan la ventaja de que pueden detectar desplazamientos del robot incluso cuando las ruedas del robot están detenidas. Otros posibles usos del acelerómetro son la detección de colisiones o la teleoperación robótica.

Algunas desventajas de los acelerómetros son que detectan con dificultad las aceleraciones de pequeña magnitud (como por ejemplo al realizar giros muy lentos) y que son muy sensibles a irregularidades en el suelo.

### 2.2.3.6. Datos exteroceptivos

Este tipo de datos nos brindan información del medio exterior al recibir estímulos externos como temperatura, presión, acidez o alcalinidad, luz, etc. Los datos obtenidos por este tipo de sensores normalmente son interpretados por los robots como características del medio, donde a partir de estos, se elaboran mapas del entorno, conociendo los elementos que lo conforman.

### 2.2.3.7. Sensores láser

La palabra láser responde a las siglas en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)*. Por lo general un sensor láser, es un dispositivo que emite un haz de luz por medio de un elemento transmisor y recibe devuelta ese



mismo haz de luz por medio de un elemento receptor, una vez que este es reflejado o interrumpido por un objeto, como se muestra a continuación.

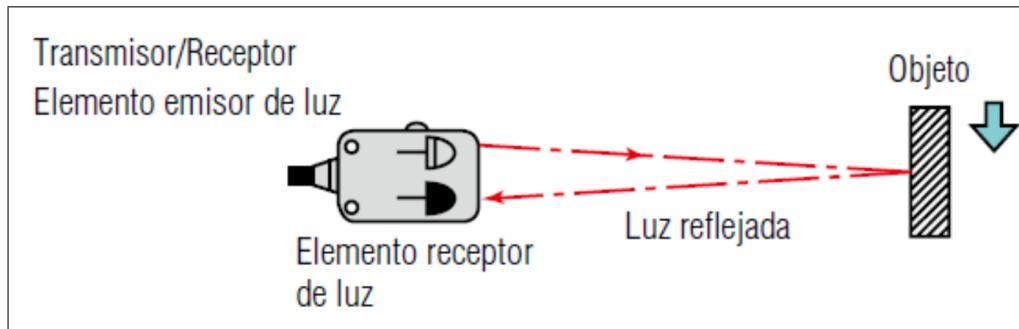


Figura 2.38: Funcionamiento de un sensor láser.

El sensor LIDAR es un tipo de sensor láser, que basa su funcionamiento en la medida del *tiempo de vuelo* como se observa en la *Figura 2.39*. Para determinar la distancia a la que se encuentra un objeto, el sensor emite un pulso de luz infrarroja, cuando el pulso incide sobre el objeto más cercano, regresa hacia el sensor y se determina el tiempo transcurrido. Conocido el tiempo de ida y el tiempo de vuelta del pulso (tiempo de vuelo), se calcula fácilmente la distancia al objeto detectado. De este modo es posible medir la distancia en una sola dirección, pero gracias a que el sensor LIDAR dispone internamente de un espejo rotatorio, logra un efecto de barrido de 360°. Cabe mencionar que, si los pulsos emitidos no indicen sobre ningún objeto cercano, el láser devuelve la distancia máxima, dando lugar a un conjunto de medidas que forman un semicírculo. Al conjunto de medidas que obtiene el láser se le denomina barrido láser.

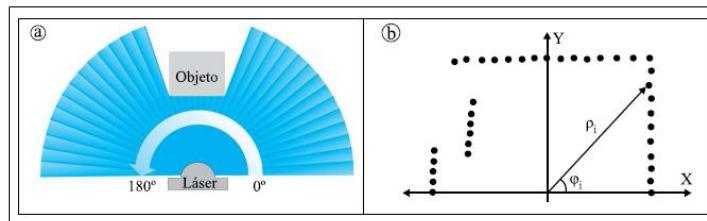


Figura 2.39: Funcionamiento del sensor LIDAR.

### 2.2.3.8. Sensor LIDAR LDS-01

Es un sensor láser 2D capaz de escanear en 360° las diferentes distancias, las cuales son utilizadas para llevar a cabo el *SLAM* para la localización y *VFH* para la esquivación obstáculos.

Elemento	Características
Voltaje de Operación	5V ± 5 %
Fuente de Luz	Diodo semiconductor de láser ( $\lambda=785\text{nm}$ )
Seguridad del láser	IEC60825-1 Clase 1
Consumo de corriente	400 mA o menor (Corriente pico 1A)
Detección de distancia	120mm – 3,500mm
Interfaz	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 3.3V USART(230,400 bps)</li> <li>■ 42bytes por 6 grados, Opción full dúplex.</li> </ul>
Resistencia a la luz	10,000 lux o menos
Frecuencia de Muestreo	1.8kHz
Dimensiones	69.5(Ancho) X 95.5(Largo) X 39.5(Alto)mm
Masa	Debajo de 125g

Tabla 2.12: Características del sensor LIDAR.



### 2.2.3.9. Dimensiones

En las *Figuras 2.40* y *2.41* se muestran las dimensiones del sensor LIDAR.

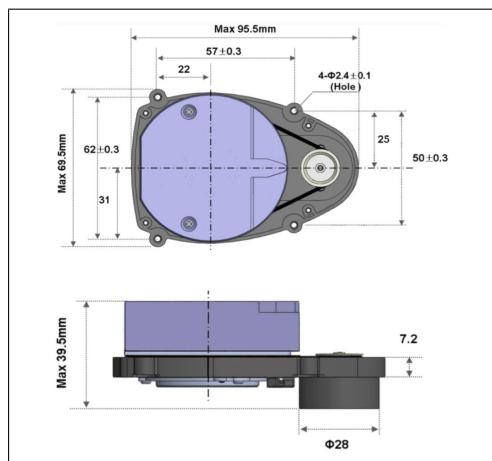


Figura 2.40: Dimensiones del sensor LIDAR. Vista superior y lateral.

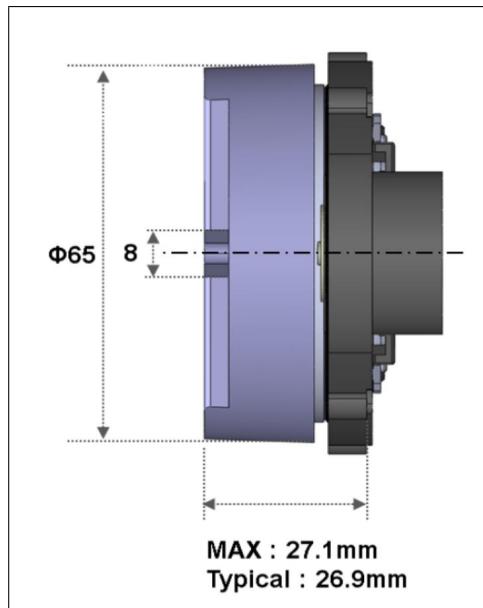


Figura 2.41: Vista Frontal del sensor LIDAR.



### 2.2.3.10. Acondicionamiento

Para conectar el sensor LIDAR a la tarjeta Raspberry Pi 3, se usa un convertidor de protocolo USB a protocolo UART, como se observa en la *Figura 2.42*, esto debido a que el LIDAR recibe comandos de 40 bytes con los cuales decide cada cuantos grados va a realizar un escaneo, así como también, la intensidad del láser. Al finalizar de recibir los 40 bytes se comprueba mediante una suma si los datos fueron correctos y se prosigue, en caso contrario, se vuelven a enviar los datos.

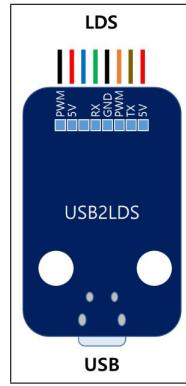


Figura 2.42: Pines del sensor LIDAR.

La descripción de los pines se muestra a continuación en la *Tablas 2.13, 2.14* y *2.15* en las cuales se considera tanto el actuador encargado del giro del sensor LIDAR, así como también el circuito de control del láser.

Número del Pin	Nombre	Descripción
6	Vcc (+5.0V)	Fuente de alimentación (positiva).
5	Tx	Salida serial del LIDAR.
4	PWM	Salida del LIDAR para controlar al motor.
3	GND	Tierra.
2	RX	Entrada serial del LIDAR
1	BOOT0	Pin para entrar en modo booteo.

Tabla 2.13: Descripción de los pines del sensor LIDAR.



Número del Pin	Nombre	Descripción
2	Vcc (+5.0V)	Fuente de alimentación (positiva).
1	PWM	Entrada del motor para controlar posición.

Tabla 2.14: Descripción de los pines del motor del sensor LIDAR.

Clave	Descripción
b	Comenzar la operación.
e	Pausar la operación.

Tabla 2.15: Comandos para operación del LIDAR.

#### 2.2.4. Área Funcional 4: *Alimentación (Suministro de energía)*

La cuarta área funcional denominada *Alimentación*, es la encargada de abastecer de energía por medio de una batería (*Figura 2.44*) a tres áreas fundamentales para los robots. Es necesario abastecer de energía a dos tarjetas de procesamiento, en segunda área funcional; Raspberry Pi 3 y la ARM Cortex M7. En la tercera área funcional, es necesario alimentar al sensor LIDAR encargado de la recabación de la información del ambiente, y en la quinta y última área funcional encargada del movimiento, es necesario abastecer de energía a dos actuadores Dynamixel (uno en cada llanta), responsables del movimiento en los robots y de la ejecución de toda la información antes proporcionada por las distintas áreas funcionales.



La responsable de abastecer energía a todos los elementos que conforman a cada una de las áreas funcionales antes mencionadas, es una batería de tipo LiPo (*Polímero de Litio*) ubicada en la primera capa del TurtleBot3, como se muestra en la *Figura 2.43*.

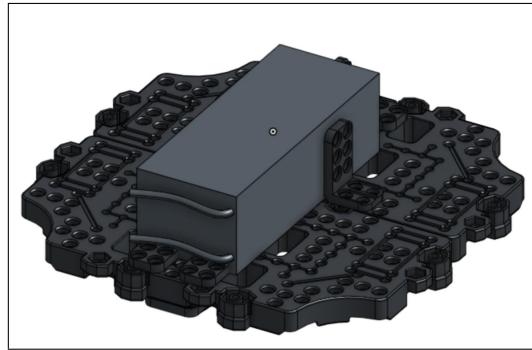


Figura 2.43: Ubicación de la batería de alimentación. Primera capa del Turtlebot3.

La batería tiene una capacidad nominal de 1800 mAh con una sola salida de 11.1V que abastece de energía a todo el robot y una entrada como se muestra en la *Figura 2.44*, encargada de cargar a la batería.



Figura 2.44: Batería LiPo, con su entrada y salida [33].



#### 2.2.4.1. Características Técnicas de la batería LiPo.

Nombre	Característica
Nombre de la marca	GTK
Número de modelo	473474P
Capacidad nominal	1800 mAh
Capacidad	1500 mAh
Batería tipo	Polímero de Litio
Peso [g]	106
Tamaño [mm]	26 x 35 x 88
Componentes	3 celdas
Electricidad [Wh]	19.98
Voltaje [V]	11.1
Velocidad continua de descarga	10C
Seguridad	PCM (Por sus siglas en inglés Protection Circuit Module)

Tabla 2.16: Especificaciones técnicas de la batería. [11]

#### 2.2.4.2. Ensamble de la batería LiPo con la estructura

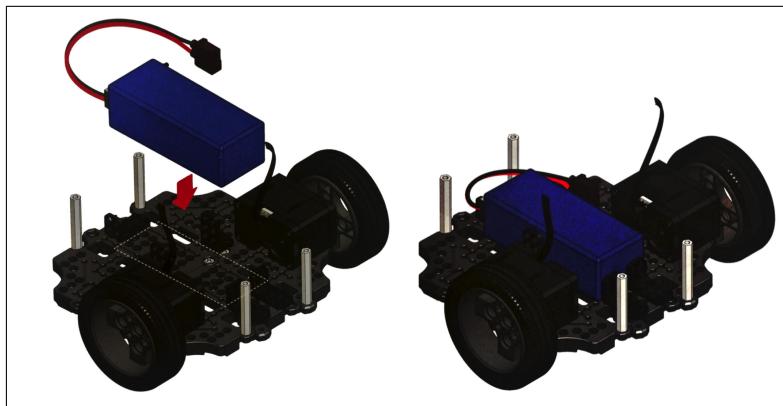


Figura 2.45: Ensamble de la batería LiPo en la primera capa del Turtlebot3.

Como ya se ha mencionado, la batería LiPo va ensamblada en el primer piso de cada uno de los robots y cuenta con cuatro soportes que limitan el movimiento de misma. A los costados se encuentran los actuadores de los robots y en la parte de arriba se encuentran las tarjetas de procesamiento y el sensor LIDAR. En la sección de *Integración del Sistema* se habla más a detalle.

### 2.2.5. Área Funcional 5: *Movimiento (Desplazamiento del robot)*

El movimiento o locomoción forma una parte fundamental del proyecto, ya que es la última función antes de que el robot ejecute las instrucciones proporcionadas por las 4 funciones previas que engloban el proyecto. En la *Figura 2.46* se muestra el proceso de ensamble para cada llanta.



Figura 2.46: Ensamble del rin y la llanta de los robots.

El sistema de locomoción se encuentra en la primera capa dentro de la estructura de los robots, y tiene como eje fundamental dos actuadores Dynamixel XL 430 - W250 en cada llanta, lo que se traduce a una configuración cinemática de tracción diferencial como se muestra en las *Figuras 2.47* y *2.48*.



Figura 2.47: Estructura de la locomoción de los robots.



Figura 2.48: Ensamble de los actuadores con la estructura.

### 2.2.5.1. Actuadores Dynamixel

Para el control de la posición y velocidad de los robots, se utilizan dos motores Dynamixel XL430-W250-T por cada robot, los cuales cuentan con un controlador interno capaz de ajustarse hasta en 6 modos distintos. La información o instrucciones se transmiten por medio del protocolo UART a la Open CR, encargada de mandar información a los motores [27].



### 2.2.5.2. Análisis interno del motor

El actuador básicamente está compuesto por un motor de CD, una tarjeta controladora y un encoder, como se muestra en la *Figura 2.49*. La tarjeta controladora se encarga de la recepción y ejecución de las instrucciones, así como también de leer los valores del sensor, mientras que el encoder es el sensor encargado de determinar la posición.

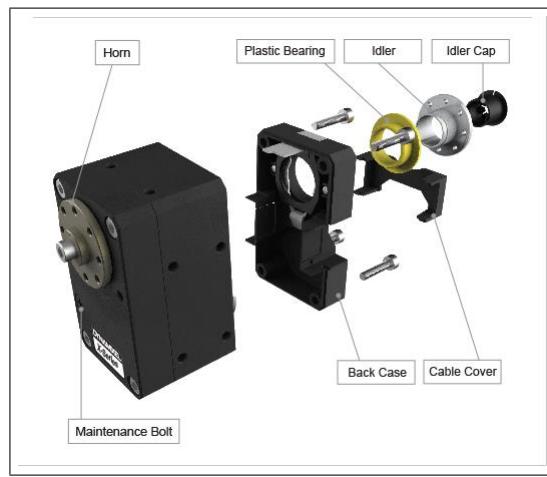


Figura 2.49: Explosión del motor del Dynamixel.

Los tipos de control que puede realizar la tarjeta controladora del Dynamixel son los siguientes:

- Control de par.
- Control de velocidad.
- Control de posición.
- Control extendido de posición.
- Control de corriente basado en el control de posición.
- Control PWM.



Figura 2.50: Características del actuador.

Los actuadores Dynamixel son uno de los mejores y más avanzados motores económicos y de alto rendimiento, también llamados actuadores inteligentes. Ofrecen la posibilidad de programar entre 50 y 57 comandos, permitiendo definir el comportamiento del actuador de una mejor y otorgando funciones especiales como las mostradas en la *Figura 2.50*, que en comparación con un servomotor típico, este solo interpreta la orden de “ángulo objetivo” proporcionado por una señal PWM.

En las *Figuras 2.51* y *2.52* se muestran los motores ya ensamblados para formar la configuración diferencial.

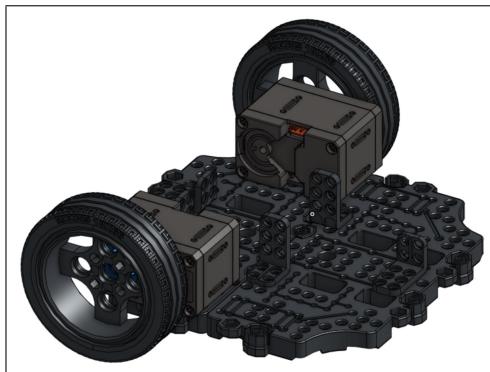


Figura 2.51: Sistema de locomoción en conjunto con los actuadores Dynamixel XL 430 - W250.

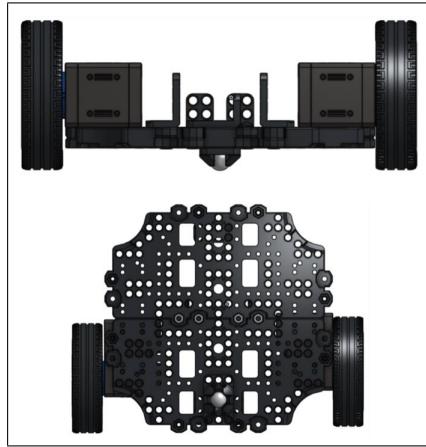


Figura 2.52: Sistema de locomoción en conjunto con los actuadores Dynamixel XL 430 - W250. Vista frontal e inferior.

#### 2.2.5.3. Características del motor

Los actuadores Dynamixel son capaces de proporcionar valiosa información de retroalimentación permitiendo leer y procesar información en tiempo real captada por sus sensores embebidos, haciéndolo sumamente útil para la odometría. Entre la información que pueden proporcionar los actuadores Dynamixel se encuentra leer la posición actual del motor, la velocidad, la temperatura interna, el par y la tensión de alimentación.

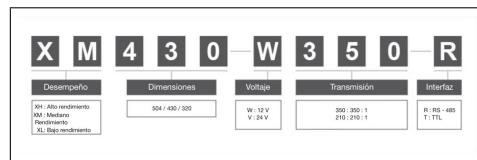


Figura 2.53: Nomenclatura de los actuadores Dynamixel [27].

Los actuadores Dynamixel XL 430 - W250, son los actuadores del más bajo desempeño dentro de las tres posibles clasificaciones de los actuadores (*Figura 2.53*), y cuyas especificaciones y características técnicas se mencionan en la *Tabla 2.17*, en conjunto con sus curvas características mostradas en la *Figura 2.54*.



Elemento	Características
Nombre del modelo	XL 430 W250
Peso [g]	57.2
Dimensiones [mm]	28.3 x 46.5 x 34
Transmisión	258.5: 1
Voltaje de operación [V]	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 9.0</li> <li>■ 11.1</li> <li>■ 12.0</li> </ul>
Torque	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1.0 [N.m] (a 9.0 [V], 1.0 [A])</li> <li>■ 1.4 [Nm] (a 11.1 [V], 1.3 [A])</li> <li>■ 1.5 [Nm] (a 12.0 [V], 1.4 [A])</li> </ul>
Velocidad de paso (sin carga)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 47 [rev/min] (a 9.0 [V])</li> <li>■ 57 [rev/min] (a 11.1 [V])</li> <li>■ 61 [rev/min] (a 12.0 [V])</li> </ul>

Tabla 2.17: Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte A

[26].

Elemento	Características
Algoritmo de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PID</li> </ul>
Grados de precisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0.088°</li> </ul>
MCU	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ST CORTEX M3 32 Bits</li> </ul>
Sensor de posición	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Enconder sin contacto (12Bit, 360) por AMS</li> </ul>
Resolución	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0.088 x 4.096 pasos</li> </ul>
Rango de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modo control de velocidad: Encendido sin fin.</li> <li>▪ Modo control de posición: 0° a 360°.</li> <li>▪ Modo control extendido: 256 revoluciones.</li> <li>▪ Modo control PWM: Encendido sin fin.</li> </ul>
Voltaje de salida [V]	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 6.5 a 12.0V (Voltaje recomendado: 11.1 V)</li> </ul>

Tabla 2.18: Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte B



Elemento	Características
Temperatura de operación	5°C a 72°C
Señales de control	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Paquete digital</li> </ul>
Tipo de protocolo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Comunicación serie asíncrona semidúplex (8 bits, sin paridad)</li> </ul>
Transmisión de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 9600 bps a 4.5 Mbps</li> </ul>
Retroalimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Posición</li> <li>■ Velocidad</li> <li>■ Carga</li> <li>■ Trayectoria</li> <li>■ Temperatura</li> <li>■ Voltaje de entrada</li> </ul>
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Carcasa: Plástico.</li> <li>■ Engranes: Plástico.</li> </ul>

Tabla 2.19: Características técnicas del actuador Dynamixel XL 430 W250 parte C [26].

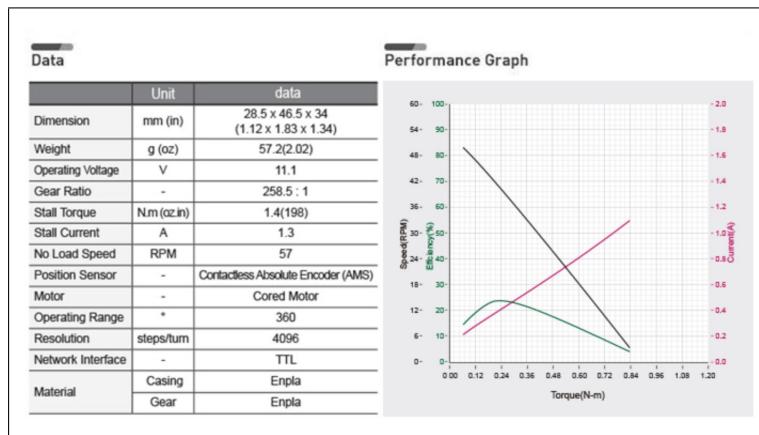


Figura 2.54: Gráfica de funcionamiento del motor DYNAMIXEL [27].

Entre cualidades del motor Dynamixel XL 430 W250 actuador tenemos:

1. Torque mejorado y diseño compacto.
2. 6 modos de funcionamiento.
3. Control perfil para la planificación de movimientos.
4. Eficiencia energética con tiempo mejorado de operación.

En cuanto a la programación de los actuadores Dynamixel, estos pueden ser programados mediante los siguientes lenguajes de programación.

- OpenCM ID.
- C/C++, Labview, Matlab, Visual Basic.
- Software exclusivo [Dynamixel Workbench].

Basándose en este último, el Dynamixel Workbench es un metapquete que contiene cuatro paquetes fundamentales, los cuales son; administrador único (single manager), controlador, operador y caja de herramientas (Toolbox).



El paquete de administrador único (single manager) provee de paquetes que pueden programar todas las series del Dynamixel, incluidas la serie X, y la PRO utilizando la biblioteca del Toolbox. Estos paquetes no sólo muestran el estado del Dynamixel, sino que también, permiten cambiar los valores de las direcciones de la tabla de control por comandos de línea o mediante la interfaz gráfica. El paquete de controladores nos presenta como utilizar los actuadores Dynamixel en diferentes modos de operación con la librería de Dynamixel Workbench Toolbox. La interfaz gráfica de Dynamixel Workbench se muestra en la *Figura 2.55*.

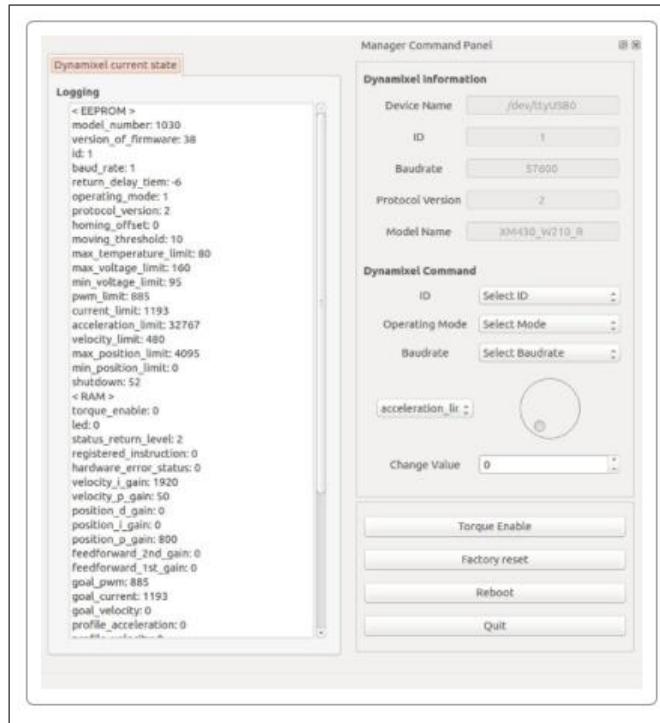


Figura 2.55: Interfaz de programación de los actuadores Dynamixel.



### 2.2.6. Integración del Sistema

Una vez conociendo todos los elementos que conforman a los robots móviles, se da paso a la integración de todos los componentes dentro de la primera área funcional que es la de *Estructura*. La primera plataforma o capa es destinada al montaje de los dos actuadores Dynamixel, en conjunto con la batería LiPo que suministra energía a todo el robot como se muestra en la *Figura 2.56*.

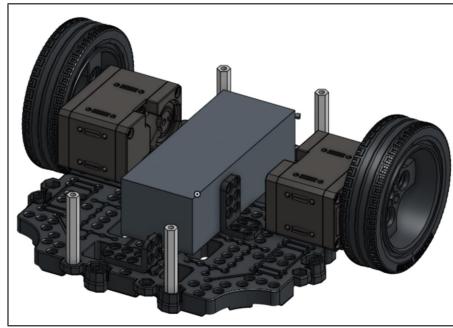


Figura 2.56: Capa 1. Implementación de la capa con los actuadores y la batería LiPo.

La segunda capa como se muestra en la *Figura 2.57* es la destinada para el montaje la tarjeta OpenCR, encargada de mandar las señales de control a los actuadores y leer señales externas que ayuden al funcionamiento del robot como pueden ser sensores o interfaces por medio de botones mecánicos.

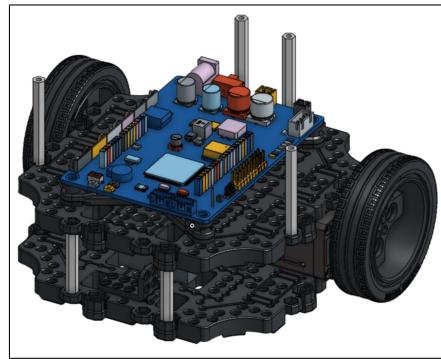


Figura 2.57: Capa 2. Implementación de la capa 1, capa 2 y tarjeta Open CR.



En la tercera capa como se muestra en la *Figura 2.58* se coloca la Raspberry Pi 3 encargada de ejecutar el sistema operativo ROS y el conector USB para leer el sensor LIDAR. Y, por último, en la última capa se coloca el sensor LIDAR sin ningún elemento extra para que este pueda escanear su alrededor sin ninguna interferencia, otorgándole de esta manera un correcto funcionamiento al sensor.

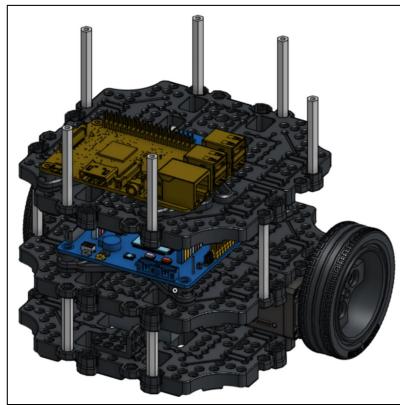


Figura 2.58: Capa 3. Implementación de la capa 1, capa 2, capa 3 y tarjeta Raspberry Pi 3.

Ya explicadas las distintas capas que conforman todo el sistema del robot, se muestra ensamblaje del robot en las *Figuras 2.59* y *2.60* utilizando un total de 193 piezas en la parte estructural y 12 piezas que involucran la parte electrónica.

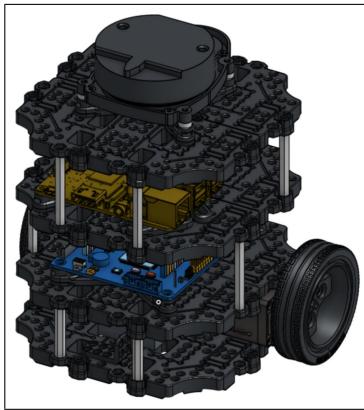


Figura 2.59: Vista isométrica del robot con todas las capas ensambladas.

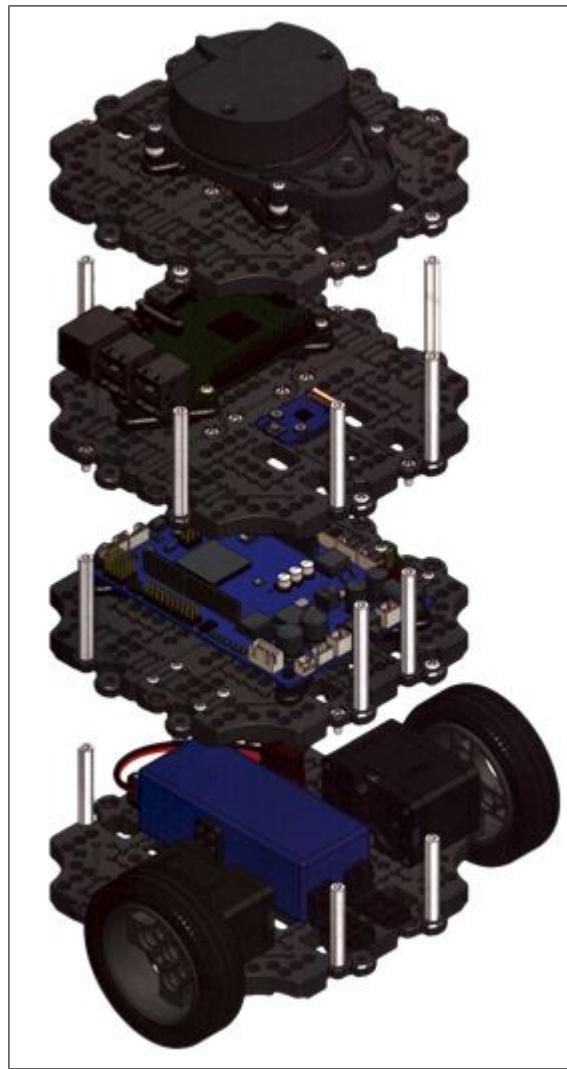


Figura 2.60: Explosión y distribución de los componentes que conforman al robot.

#### 2.2.6.1. Elementos de Software

Respecto a la parte de procesamiento, las áreas funcionales se desarrollan en diferentes nodos de ROS, es decir, un programa no cumple una función completa, sino que dicho programa está dividido en distintos nodos. La manera en que los diversos nodos se comunican es mediante el uso de tópicos, los cuales también son enlistados en la sección de transmisión de mensajes. Una manera simple de mostrar



la integración de estos nodos es a través de los siguientes diagramas, los cuales presentan los nodos activos para cada TurtleBot3 burger. Se proponen, para el líder y seguidor la interconexión de los siguientes nodos mostrados en las *Figuras 2.61* y *2.62*.

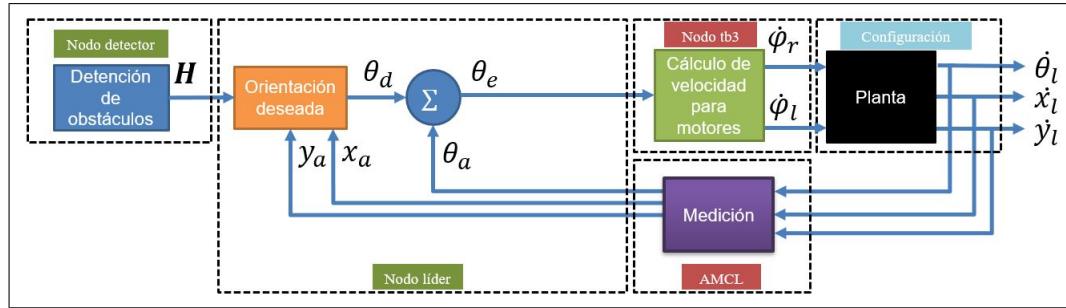


Figura 2.61: Esquema general de funcionamiento del sistema de control para el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos.

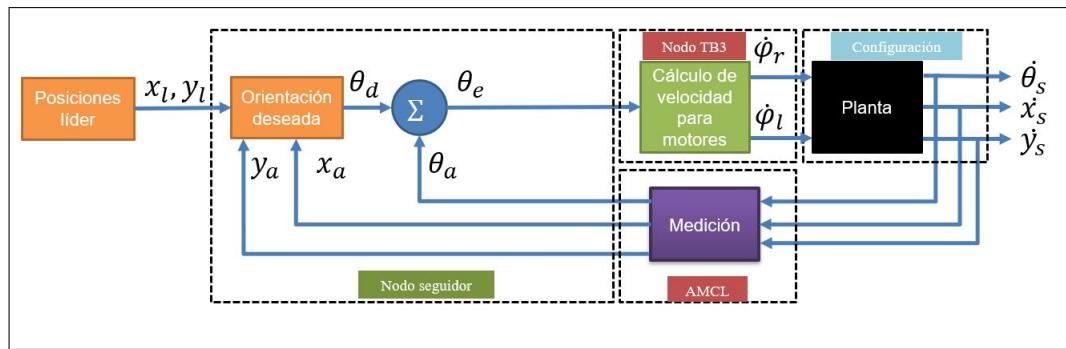


Figura 2.62: Esquema general de funcionamiento del sistema de control para el seguidor.

La manera de formar esta integración es muy directa, ya que dentro de cada nodo hay objetos que se suscriben a tópicos, y otros que publican la información ya procesada, por lo que estos de manera natural pueden y están hechos para trabajar en conjunto.



Para mandar a llamar a todos los nodos, se hace uso de otro tipo de archivo de ROS con extensión .launch, el cual permite mandar a llamar a los nodos de manera automática. Para lograr la integración que se propone en los diagramas de las *Figuras 2.61 y 2.62*, se debe primero mandar a llamar el nodo que inicializa a los motores y el nodo que inicializa el sensor LIDAR. Posteriormente se manda a llamar el mapa, para la localización. Una vez inicializado el mapa, se manda a llamar a los nodos líder y seguidor, en los cuales se ejecuta la parte modular del proyecto para finalmente mandar a llamar por medio de otro archivo .launch, al localizador del líder y al localizador del seguidor.

Los diagramas antes presentados muestran la integración de los nodos, sin embargo, dentro de cada nodo existen tópicos (variables compartidas) los cuales también forman parte de la integración de dichos códigos. El diagrama de la *Figura 2.63* muestra como esos tópicos se comunican y van transformando la información, cada vez que pasa por algún nodo.

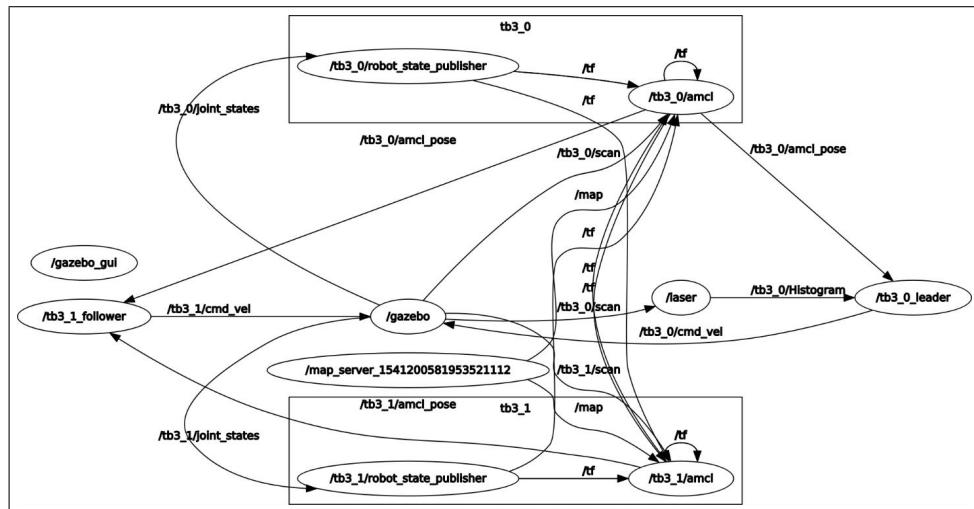


Figura 2.63: Comunicación entre tópicos de los distintos nodos.



### 2.2.7. HMI

La interfaz o HMI por sus siglas en inglés (*Human Machine Interface*) forma parte indirectamente del área funcional de Procesamiento como se puede observar en la *Figura 2.9* en la página 33, esto debido a que aunque la interfaz no se encuentre dentro de los robots, trabaja directamente con el procesamiento de los móviles, y se caracteriza por ser el puente de comunicación entre el usuario, el robot líder y el robot seguidor, en donde el usuario selecciona y envía datos a través de una computadora.

#### 2.2.7.1. Comunicación peer to peer

Como ya se ha hablado con anterioridad en el glosario, el uso del término “nodo” dentro de ROS, ejecuta una serie de procesos conectados en un mismo tiempo de ejecución a un determinado número de anfitriones, dependiendo del número de nodos. Cuando muchos nodos se están ejecutando al mismo tiempo, se realiza una comunicación “peer-to-peer”, que, en otras palabras, es la topología de enlace entre los distintos nodos. Este tipo de topología requiere de un maestro que permita que los procesos se encuentren los unos con otros. Esto se ejemplifica en la *Figura 2.64*.

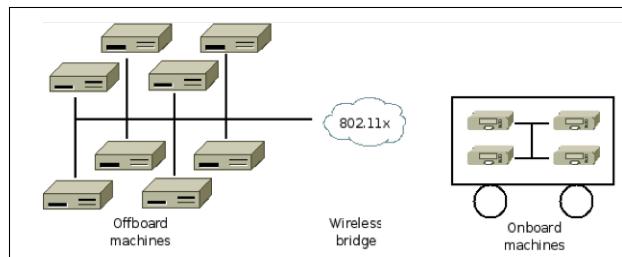


Figura 2.64: Conexión típica de ROS.

Para el desarrollo de la interfaz gráfica es importante entender cómo trabaja este tipo de comunicación, ya que la interfaz gráfica que se implementa desde una computadora funciona como anfitrión (teniendo un único anfitrión), que envía mensajes mediante la publicación en un tópico (entendiéndose tópico como el intercambio de información de los nodos) y llamando a los nodos interesados a procedimientos



remotos, suscribiendo su información a el tipo de tópico en proceso como se muestra en la *Figura 2.65*.

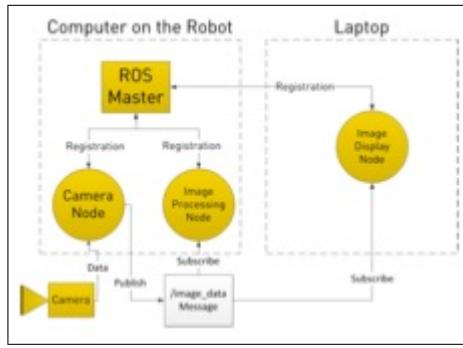


Figura 2.65: Ejemplo de comunicación de ROS con agentes externos.

La *Figura 2.64*, sirve como ejemplo para el desarrollo de la interfaz (agente externo) y su comunicación con ROS, ya que a diferencia de utilizar una cámara como se muestra en la *Figura 2.65*, la recabación de los datos exteroceptivos de cada robot, es mediante un sensor LIDAR.

### 2.2.8. Validación y análisis de resultados

Es de suma importancia que en cualquier proceso de investigación y diseño antes de la construcción exista una validación, ya que se corre el riesgo de que las propuestas de diseño diverjan de la realidad, no sean factibles o simplemente disfuncional, es por esta razón que se necesita realizar una simulación lo más cercana a la realidad en la que se puedan probar los algoritmos implementados en el área funcional de procesamiento.

El objetivo que se persigue en esta validación es determinar si los algoritmos implementados en un TurtleBot3 burger virtual cumplen su función o no.



### 2.2.8.1. Procesamiento

Cada validación consistió en la programación de los nodos propuestos para cada sección del área funcional en el lenguaje de programación Python; del cual es relevante mencionar que es compatible con las tarjetas de procesamiento de los TurtleBot3 burger. Una vez hechos los programas, fueron implementados en un ambiente de simulación llamado *Gazebo* incluyendo allí el modelo 3D del TurtleBot3 burger, con sus características físicas y restricciones mecánicas como la velocidad máxima en cada motor. Posteriormente los datos de cada una de las simulaciones fueron grabados con el comando de ROS (Rosbags) y graficados con ayuda de Excel. Dichos datos son presentados graficados en las siguientes secciones junto con un breve análisis.

### 2.2.8.2. Seguimiento de trayectoria

Lo primero por validar en el proyecto es el funcionamiento del generador de la Matriz de fuerza, para esta validación se propusieron dos trayectorias, mostradas en las *Figuras 2.66 y 2.67*, donde cada eje coordenado tiene dimensiones en metros. Una vez propuestas las trayectorias, se llevó a cabo la generación de la matriz de fuerzas como se observa en las *Figuras 2.68 y 2.69*, estas figuras también tienen sus ejes coordinados en metros. Como se puede observar de las *gráficas 2.68 y 2.69* los vectores generados siguen las trayectorias propuestas cuando están dentro de la trayectoria y se orientan al punto más cercano cuando están fuera de trayectoria, por lo cual se toma como válido el algoritmo.

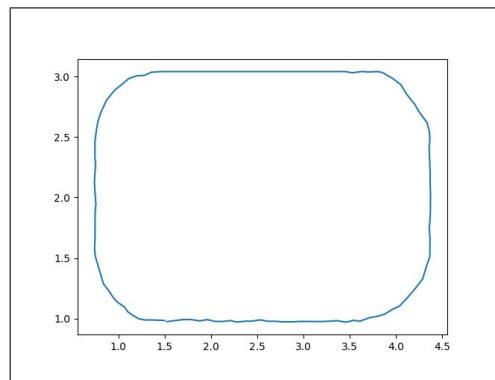


Figura 2.66: Trayectoria propuesta 1 (unidades en metros).

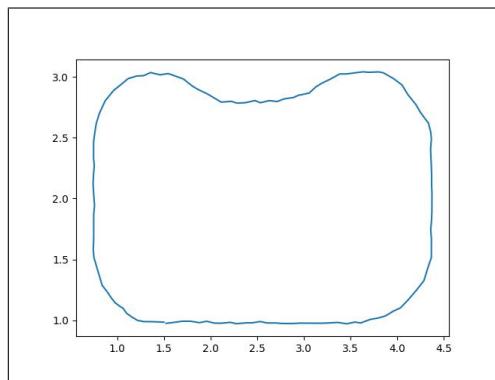


Figura 2.67: Trayectoria propuesta 2 (unidades en metros).

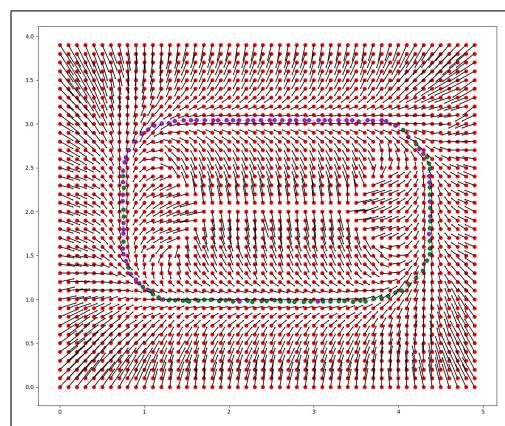


Figura 2.68: Matriz de fuerza para trayectoria propuesta 1 (unidades en metros).

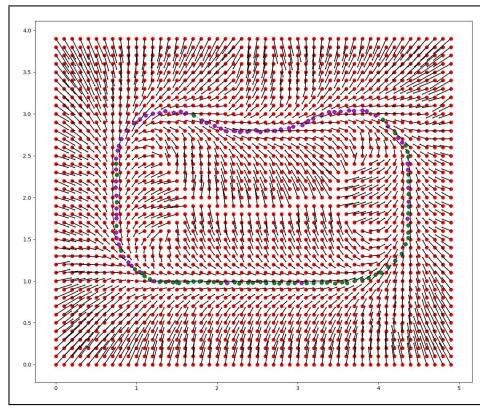


Figura 2.69: Matriz de fuerza para trayectoria propuesta 2 (unidades en metros).

A continuación se valida que el TurtleBot3 burger en el ambiente virtual sea capaz de seguir la trayectoria de la *Figura 2.66*. Recordando que la simulación es realizada en Gazebo y los datos son grabados para posteriormente ser presentados en gráficas hechas con Excel. Para esta simulación, se hizo uso del nodo líder, nodo AMCL y nodo tb3 virtual. Los datos obtenidos de la simulación se muestran en la *Figura 2.71*.



Figura 2.70: Resultados extraídos de la simulación de seguimiento de trayectoria (unidades en metros).

La *Figura 2.71* muestra los puntos de ruta alcanzados por el líder durante la simulación, en dicha gráfica cada eje coordenado se representa en metros. Para validar



esta parte de procesamiento se hace una comparación entre las *Figuras 2.71* y *2.66*, a simple vista se puede observar que los puntos representados en la *Figura 2.71* se asemejan a la trayectoria propuesta en la *Figura 2.66*, por lo tanto, se valida el funcionamiento de algoritmo de seguimiento de trayectoria.

### 2.2.8.3. Líder Seguidor

Para validar el esquema líder seguidor se inició haciendo que el líder siguiera una de las trayectorias propuestas, con todos los nodos mencionados en la validación de seguimiento de trayectorias y después ejecutar el nodo del seguidor. Los resultados de la simulación son mostrados en las *Figuras 2.71* y *2.72*, las cuales tienen las mismas dimensiones. Comparando las coordenadas por las que el líder y seguidor pasan se valida el diseño de este nodo ya que las coordenadas son muy similares, entre líder y seguidor.

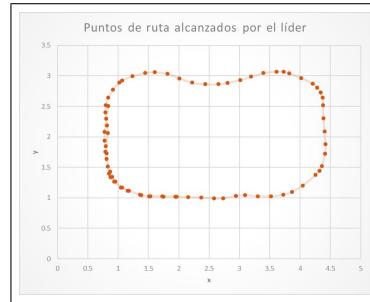


Figura 2.71: Resultados extraídos de la simulación del líder (unidades en metros).



Figura 2.72: Resultados extraídos de la simulación del seguidor (unidades en metros).



#### 2.2.8.4. Evasión de obstáculos

Para la evasión de obstáculos en el ambiente de simulación se colocaron dos objetos por donde se tenía previsto que pasara el robot líder, *Figura 2.73*, de acuerdo con la trayectoria que debía seguir, posteriormente se ejecutó el seguimiento de trayectoria y la evasión, los puntos por los que pasó el líder se muestran en *Figura 2.74*.

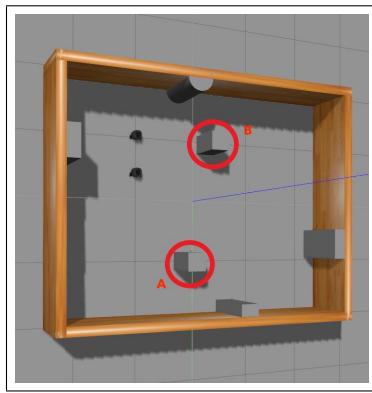


Figura 2.73: Obstáculos para la validación del algoritmo propuesto.

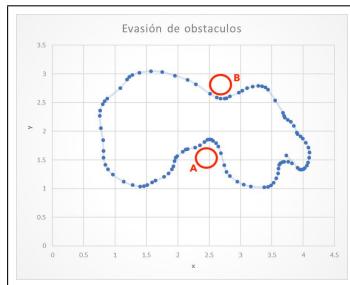


Figura 2.74: Puntos de ruta alcanzados por el líder durante la evasión de obstáculos (unidades en metros).

Durante la ejecución, el robot líder fue capaz de evadir efectivamente los obstáculos, y cuando no había obstáculo se reincorporaba a la trayectoria nuevamente, por lo tanto, se valida este algoritmo ya que cumple con la función de la evasión.

---

## Integración del Sistema

---

### 3.1. Implementación del Área Funcional Estructura

La resolución de esta área funcional está relacionada con el armado del robot, que como ya se había mencionado con anterioridad en capítulos pasados, esta área funcional tiene como requerimiento principal el albergar a todas las demás áreas funcionales, lo cual no presentó mayor dificultad porque cada robot ya viene diseñado para únicamente armar y centrarse en desarrollar el algoritmo de control *líder - seguidor*.

#### 3.1.1. Recomendaciones a considerar

Para el armado de la estructura y de las partes electrónicas se siguieron las instrucciones tal y como se indican en el manual de ensamble del TurtleBot3 burger [29], con algunos consejos que a continuación se mencionan.

- Antes de armar el TurtleBot3 burger tener todo el software de inicio instalado.
- En el caso particular de la Raspberry Pi 3, usar un cargador de 5.0V a 2A (al menos) para instalar el sistema operativo.
- Ir verificando que cada capa este bien ensamblada.



- Hacer pruebas de hardware para cada capa.
- Armarla en un lugar seguro en cual no pierdan piezas pequeñas.
- Consultar el video de armado para un mejor armado.

### 3.1.2. Armado de los robots móviles



Figura 3.1: Caja con los diferentes componentes del robot.

Los componentes del TurtleBot3 burger vienen en 4 cajas enumeradas y mostradas en la *Figura 3.1*, cada caja cuenta con distintas piezas y componentes. En la *caja 1* como se muestra en la *Figura 3.2*, viene una tarjeta microSD de 16GB, una tarjeta Raspberry Pi 3, un par de motores Dynamixel y una tarjeta OpenCR Cortex M7. En la *caja 2* mostrada en la *Figura 3.3* viene una batería LiPo junto con

### 3.1 Implementación del Área Funcional Estructura



su cargador, un desarmador, un sensor LIDAR, un conector USB2LDS y soportes para pcb's. En la *caja 3* como se muestra en la *Figura 3.4* vienen todos los pisos del robot denominados “Waffle - Plate”. En la *caja 4* mostrada en la *Figura 3.5* viene el sistema de tracción, es decir, las llantas con sus respectivas ruedas, tornillos y piezas de ensamble de todo el robot, cables y una rueda loca.



Figura 3.2: Caja 1. *MicroSD, Raspberry Pi 3, motores Dynamixel y tarjeta OpenCR Cortex M7*



Figura 3.3: Caja 2. *Batería LiPo, cargador, desarmador, sensor LIDAR, conector USB2LDS y soportes para pcb's*



Figura 3.4: Caja 3. “Waffle - Plate” pisos de los robots



Figura 3.5: Caja 4. Llantas, ruedas, tornillos, piezas de ensamble, cables y una rueda loca

Además de estas cuatro cajas, hay una caja más, no numerada donde viene la fuente de voltaje para el cargador con su respectivo cable.

### 3.1 Implementación del Área Funcional Estructura

878



Figura 3.6: Fuente de voltaje para batería LiPo.

La primera parte del armado consiste en unir cada uno de los pisos con ayuda de sus respectivos tornillos, así como también de sus distintos componentes, tal y como se muestra en las *Figuras 3.7 y 3.8*.

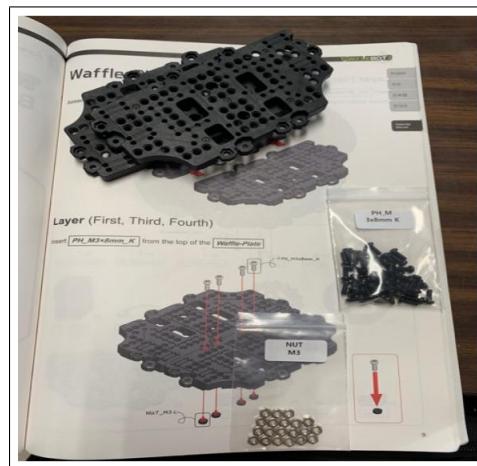


Figura 3.7: Unión de los pisos del robot.



Figura 3.8: Piezas Ensambladas.

Caber mencionar que a pesar de que en el instructivo de armado viene paso por paso, como van las piezas y cada una de las tapas, muchas veces este no es tan claro, aunado a que todas las partes del robot son muy parecidas, dando lugar a piezas mal colocadas y por ende mal ensambladas a la hora de unir cada uno de los pisos.



Figura 3.9: Ensamble del robot.



### 3.1.3. Resultados del proceso de armado

En las *Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13* se puede observar la manera en que se ven cada uno de los pisos del TurtleBot3 burger, así como también el orden en el que son ensamblados.

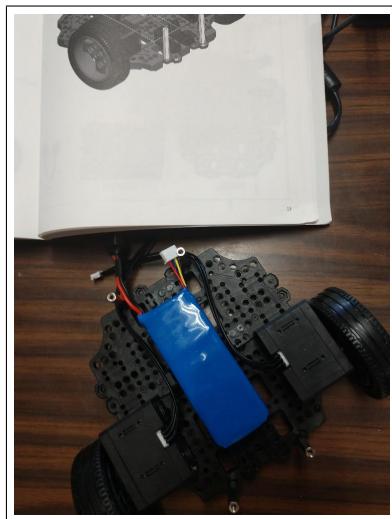


Figura 3.10: Ensamble del primer piso.



Figura 3.11: Ensamble del segundo piso.



Figura 3.12: Ensamble del tercer piso.



Figura 3.13: Ensamble final del robot.

El armado de cada robot representa un trabajo muy minucioso, ya que cada tornillo y tuerca tienen que estar en el lugar adecuado, cada piso y componente bien encajados y posicionados, dificultándose porque algunas piezas son de ensamble múltiple por lo que, si se mueve una, se tiene que reiniciar el proceso de ensamblaje. El proceso de ensamblaje duró aproximadamente 5 horas de trabajo continuo para cada TurtleBot3.

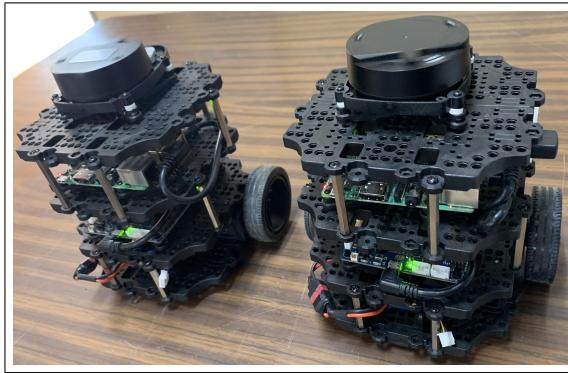


Figura 3.14: Robot líder y robot seguidor.

### 3.1.4. Verificación de ensamble del sistema

Una vez que el robot estuvo armado, se verificó que todo estuviera bien conectado, es decir, que la batería LiPo alimentara a las dos tarjetas de procesamiento (Raspberry y OpenCR) y que estas a su vez alimentaran a los subsistemas que de ellas dependen como los actuadores y el sensor LIDAR. El trabajo en conjunto del ensamble del robot junto con la programación e instalación del sistema operativo Raspbian a la Raspberry Pi 3 también proporcionó herramientas de validación para saber el estado de los elementos conectados a los móviles.

## 3.2. Implementación del Área Funcional Movimiento

Esta área funcional es la encargada de la unión de la estructura junto con su configuración mecánica. En la implementación se utilizan 2 actuadores Dynamixel por cada robot, conectados a una tarjeta OpenCR denominada tarjeta de control. Para ajustar el controlador PID encargado de mantener estable las velocidades de los robots, no es necesario realizar un cálculo de valores, ya que los motores cuentan con la opción de *autotune* que permite de forma automática, obtener los valores del controlador PID necesarios para lograr un control de velocidad y estos ya están previamente configurados, con un valor **P** de 1.1, **D** de 0.03 e **I** de 0.11.



En la *Figura 3.15* se muestra el ensamblaje mínimo para poder verificar el área funcional de movimiento usando los botones de la tarjeta OpenCR para controlar el movimiento del móvil.



Figura 3.15: Implementación del área funcional movimiento.

### 3.3. Implementación del Área Funcional Percepción

En la implementación de la tercera área funcional, se utilizan 2 sensores; el LIDAR y el encoder del actuador, que en conjunto logran percibir el entorno brindando así la posibilidad de conocer la posición de cada robot y determinar los elementos presentes en el área de trabajo, obstáculos, límites, paredes, etc.

#### 3.3.1. Sensor LIDAR

El primer sensor involucrado es el sensor LIDAR, que por medio de este sensor se miden las distancias mínimas de la cercanía, hacia algún objeto (en el caso del proyecto puede ser una pared o un obstáculo), calculando así las distancias mínimas para cada uno de los 360 grados que rodean al robot.



Para su implementación este sensor fue colocado en la capa superior de cada robot como se observa en *Figura 3.16*, teniendo en cuenta que cada sensor es independiente el uno del otro, y al verificar su correcto funcionamiento en los robots, se deben aplicar los mismos pasos para cada uno de ellos. Posteriormente se realizan las pruebas en la interfaz gráfica proporcionada por el fabricante (previamente realizadas las configuraciones básicas del TurtleBot3 que se explican a detalle en la sección de Procesamiento) arrojando como resultados las distancias reflejadas en un mapa 2D del sensor LIDAR, comprobando así, su correcto funcionamiento.

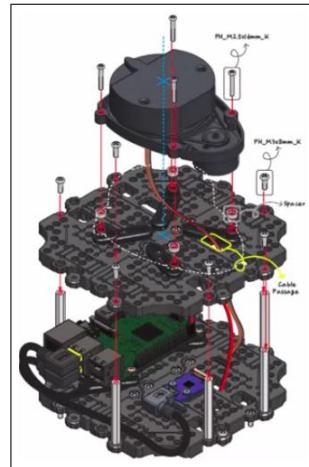


Figura 3.16: Montaje del sensor LIDAR en la estructura.

Como se puede observar en la *Figura 3.16* se debe cuidar la orientación en la que se coloca el sensor LIDAR, colocándolo de tal forma como se muestra en la *Figura 3.16*, ya que el sistema de referencia entre el robot y los datos arrojados en la interfaz son propuestos, considerando que el sensor LIDAR tiene su origen en 0 grados en la parte frontal del robot.

Al no respetarse esta condición da como resultado un desfasamiento en el ángulo, afectando la realización del mapa del entorno y que posteriormente viéndose reflejado en un desfase angular en los demás robots que no tengan la misma orientación que el robot que realizó el escaneo del mapa.



Es importante también señalar que el sensor LIDAR cuenta al frente con un indicador de fase, el cual le comunica al controlador del LIDAR que ha pasado por el 0 absoluto del sensor, realizándose esto cada que se inicia un nuevo proceso de escaneo ya que no se sabe con certeza en qué posición está apuntando el del sensor LIDAR en un inicio.



Figura 3.17: Sensor LIDAR del Turtlebot 3 burger.

Para comprobar que el sensor está funcionando correctamente se cuenta con un programa que inicializa los nodos necesarios para el funcionamiento básico del robot, el cual comunica el robot con la computadora principal, además de obtener y mandar datos al sensor LIDAR y a los motores, por medio de la tarjeta OpenCR.

Las instrucciones para correr esta verificación son las siguientes.

- `roscore` (En la PC principal)
- `rosrun turtlebot3 turtlebot3_bringup.launch` (En la Raspberry Pi 3)
- `rosrun turtlebot3_slam turtlebot3_slam.launch` (En la PC principal)

Al correr estos comandos, habiendo configurado correctamente la comunicación entre el TurtleBot3 y la PC principal, se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 3.18*, donde los puntos en verde son las distancias escaneadas por el LIDAR.

### 3.3 Implementación del Área Funcional Percepción

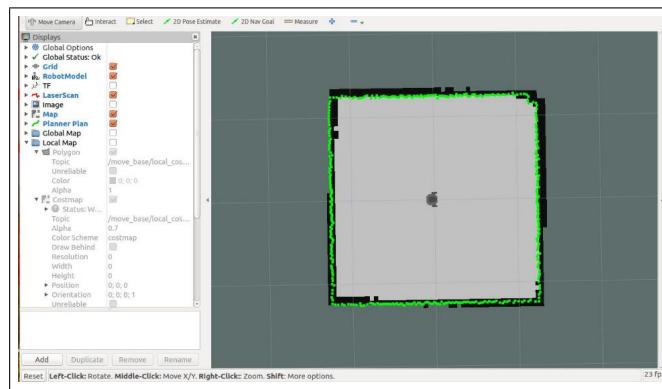


Figura 3.18: Distancias del LIDAR en RVIZ

Adicionalmente se pueden ver los valores de las distancias si se ejecuta el comando:

- rqt (En la PC principal)

Al abrirse la ventana como se muestra en la *Figura 3.19* se pueden observar los valores de los mensajes publicados, y marcándose la casilla se pueden leer y ver su valor en la pantalla. Para verificar los datos que arroja el sensor se marca la casilla /scan, en donde si no aparece nada significa que se tiene problemas con el sensor LIDAR o la ejecución de los comandos ha sido incorrecta.

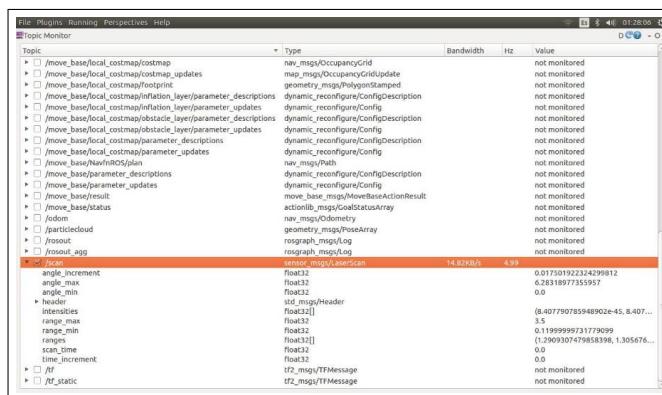


Figura 3.19: Visualización en rqt de los valores del sensor LIDAR.



### 3.3.2. Sensores del motor DYNAMIXEL

El segundo sensor involucrado es el encoder contenido en los motores DYNAMIXEL mostrado en la *Figura 3.20*, este encoder lleva a cabo la tarea en conjunto con el microcontrolador del motor, de estimar el desplazamiento que ha tenido el robot.



Figura 3.20: Motores DYNAMIXEL XL430.

Para la implementación de este sensor se colocan los 2 motores en la estructura conectados a la tarjeta OpenCR como se muestra en la *Figura 3.21*.

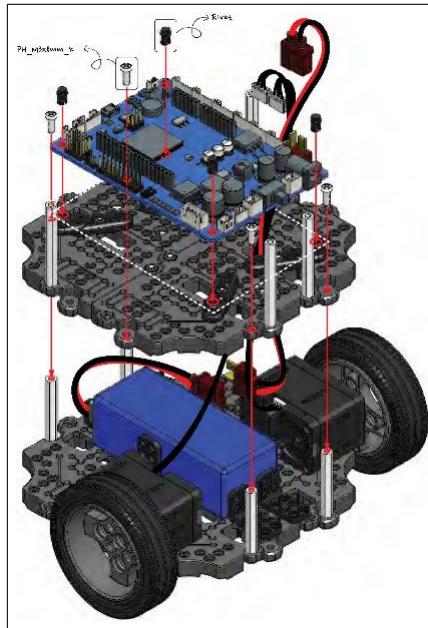


Figura 3.21: Ensamble de los motores, OpenCR y batería LiPo.

### 3.3 Implementación del Área Funcional Percepción



Una vez ensamblada esa capa, se procede a verificar el funcionamiento de los motores, así como el funcionamiento de los encoders por medio del programa base que se carga a la OpenCR. Este programa hace dos pruebas con los motores; una para lograr un desplazamiento lineal y otra para lograr un desplazamiento angular (giro de 180° conforme al centro del robot) en la posición del robot.

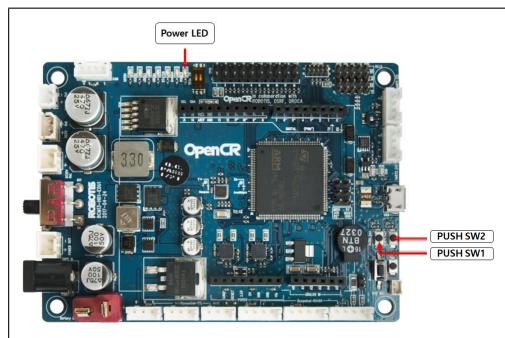


Figura 3.22: Localización de los botones de prueba en la tarjeta OpenCR.

El proceso de verificación del correcto funcionamiento de los encoders y el giro de los motores es el siguiente:

- Revisar que todos los elementos estén ensamblados al menos hasta la capa 2.
- Encender el robot por medio del switch que trae consigo la tarjeta Open CR.
- Presionar por 3 segundos el botón PUSH SW1 visto en la *Figura 3.22* para verificar que el robot avance alrededor de 30 cm.
- Presionar por 3 segundos el botón PUSH SW2 visto en la *Figura 3.22* para verificar que el robot gire 180° grados sobre su propio eje.

Si estas 2 pruebas se cumplen entonces los encoders están funcionando correctamente.



### 3.4. Implementación del Área Funcional Alimentación

Para la implementación de esta área funcional se hace uso de una batería LiPo de 11.1V y 1800mAH, vista en la *Figura 3.23*, la cual logra una carga total en aproximadamente en una hora y media de haberse puesto a cargar, y es capaz de mantener en operación al robot por aproximadamente 2 horas en funcionamiento de uso moderado.



Figura 3.23: Batería LiPo LB-012.

Para verificar su correcto funcionamiento solamente se conecta al móvil siguiendo los primeros pasos de ensamble que se muestran en la *Figura 3.21* y se verifica que el Power LED de la OpenCR esté prendido, este LED se muestra en la *Figura 3.22*.

### 3.5. Implementación del Área Funcional Procesamiento

#### 3.5.1. Pasos previos

Se requiere una configuración previa de las tarjetas de procesamiento de los robots y de la computadora remota. Todos los pasos necesarios para tener en el correcto funcionamiento a los TurtleBot3, se encuentran en su manual online.



A continuación, se presentan algunos pasos adicionales que se deben realizar.

En la computadora remota se debe instalar *Ubuntu 16.04*. Hay muchos tutoriales que explican cómo hacerlo y dependiendo de la computadora, puede ser más o menos complejo, una buena fuente de referencia es la de la página web *linuxtechi* [17], aunque la mejor forma de instalar ROS en una computadora remota es bajo el método que propone el manual online de los TurtleBot3, donde todo el proceso ya es automático, proporcionando un script que va ejecutando los pasos de manera secuencial a diferencia de los métodos convencionales, donde es necesario ejecutar una serie de comandos manualmente.

Para la Raspberry Pi 3 existen dos sistemas operativos compatibles con ROS; *Raspbian* y *UbuntuMate*. Para el desarrollo del proyecto se ha optado por elegir Raspbian, ya que la forma de configurar el SSH está bien establecida en la documentación oficial de la Raspberry Pi [23], y además de que se proporciona una versión de Raspbian con ROS ya instalada en el mismo manual online, lo cual reduce en aproximadamente 2 horas el tiempo de instalación por cada tarjeta.

Para la OpenCR de igual manera existen dos formas de configurarla, la primera manera es por medio de la computadora remota, siendo más útil cuando se está ensamblando el robot por primera vez. La segunda manera es directamente desde la Raspberry Pi 3, siendo más sugerible esta opción cuando ya se tiene ensamblado el TurtleBot3, puesto que no se tiene que desconectar, ni desarmar ninguno de los pisos para poder llevar a cabo este proceso en la Raspberry Pi 3, basta con solo ejecutar el siguiente comando para que comience la descarga e instalación del programa.

```
https://github.com/ROBOTIS-GIT/OpenCR-Binaries/raw/master/turtlebot3/ROS1  
/latest/opencr_update.tar.bz2&& tar -xvf opencr_update.tar.bz2 && cd ./opencr_update  
&& ./update.sh $OPENCR_PORT $OPENCR_MODEL.opencr && cd ..
```



Lo siguiente en implementar es la simulación del modelo 3D del ambiente en el que los robots de manera virtual serán simulados. Para ello se utiliza Gazebo y se selecciona la figura que se asemeja a una pared, trazándola con las medias correctas y modificando su aspecto visual para finalmente guardar el diseño.

También es necesario configurar RViz para poder visualizar los datos de los dos robots en el mismo tiempo de ejecución. La manera de configurar RViz es editando el archivo base que proporcionan las librerías del TurtleBot3 y eliminando algunos tópicos que no son necesarios, los cuales son:

- /cost\_map
- /global\_cost\_map

Además, se deben agregar los tópicos del seguidor, que a continuación se enlistan:

- /tb3\_1/robot\_model
- /tb3\_1/laser
- /tb3\_1/amcl\_particles

Adicionalmente en conjunto con el AMCL, se realiza el mapa del ambiente virtual y del espacio real, esto con el fin de obtener la posición de los robots con ayuda de los sensores. Los comandos que también están presentes en el manual y que se ejecutan sobre la terminal de la computadora remota son:

- roslaunch turtlebot3\_slam turtlebot3\_slam.launch slam\_methods:=gmapping
- roslaunch turtlebot3\_teleop turtlebot3\_teleop\_key.launch

### 3.5.2. Comunicación

Para establecer la comunicación entre los robots y la computadora central, se deben seguir los siguientes pasos.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento



Figura 3.24: Creación de una nueva red en Ubuntu.

También es necesario configurar la red de la computadora remota como un punto de acceso, creando una nueva red, mostrada en la Figura 3.24. Posteriormente se debe seleccionar el tipo de conexión, tal y como se muestra en la *Figura 3.25*.



Figura 3.25: Elegir tipo de conexión.

Por último se editan las pestañas de las configuraciones inalámbricas y de seguridad como se muestran en las *Figuras 3.26* y *3.27*.

## Integración del Sistema

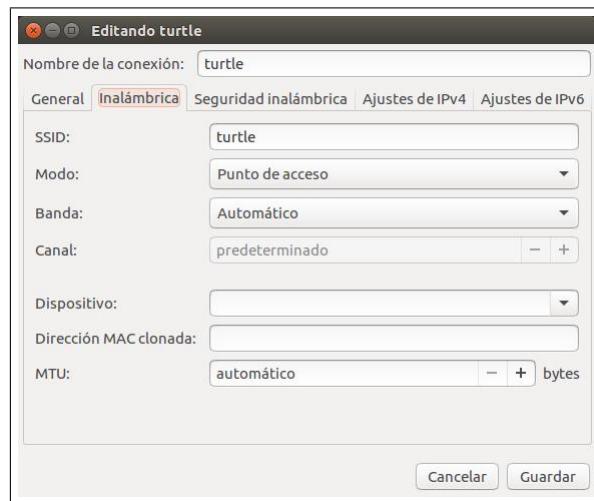


Figura 3.26: Configuración del modo y nombre.

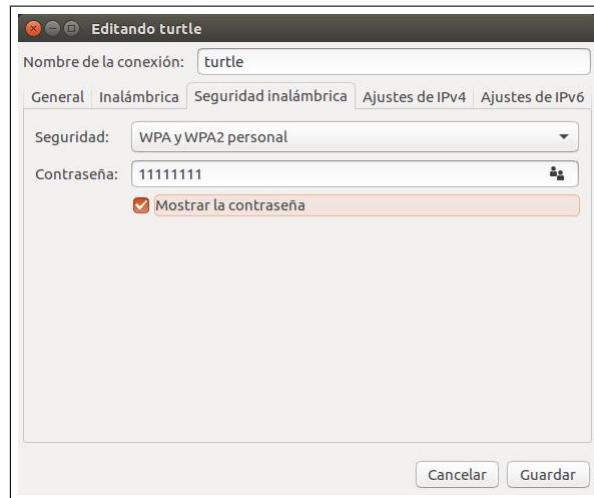


Figura 3.27: Configuración de la seguridad.

Una vez establecida la comunicación, se procede a realizar pruebas para determinar si la comunicación fue establecida correctamente. Para ello, se utiliza el comando *ping* de la terminal de Linux que envía paquetes de forma continua a cada robot, como se muestra en la *Figura 3.28*.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

```
bob@suse1:~> ping 192.168.198.130
PING 192.168.198.130 (192.168.198.130) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=1 ttl=64 time=6.14 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.778 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.599 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.558 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.615 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=6 ttl=64 time=0.608 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=7 ttl=64 time=0.645 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=8 ttl=64 time=0.619 ms
64 bytes from 192.168.198.130: icmp_seq=9 ttl=64 time=0.698 ms
^C
--- 192.168.198.130 ping statistics ---
9 packets transmitted, 9 received, 0% packet loss, time 8000ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.558/1.252/6.149/1.732 ms
```

Figura 3.28: Muestra del resultado correcto de la ejecución del comando ping.

Como se apreciar en la *Figura 3.28*, la comunicación fue establecida correctamente, ya que se recibieron todos los paquetes apropiadamente. Finalmente se prueba la comunicación de algunos tópicos simples para verificar que la configuración entre la red y ROS sea correcta, para ello se inicializa por medio de la computadora remota un TurtleBot3, además, con apoyo de la herramienta Rqt se puede visualizar el valor actual de algunos tópicos como por ejemplo, el estado de la batería mostrado en la *Figura 3.29*.

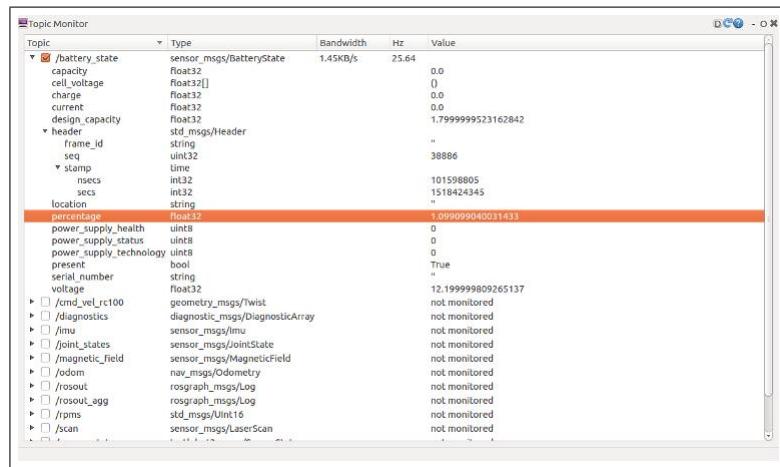


Figura 3.29: RQt mostrando los datos del tópico battery.

Todos los algoritmos de control son programados en el lenguaje de programación Python, siguiendo la lógica que fue propuesta en los diagramas de flujo posterior-



mente analizados. Los programas son almacenados en un mismo paquete llamado *esquema\_lider\_seguidor*, con el objetivo de mantener en orden la información. Para manejar la información de manera independiente, es necesario agrupar todos los tópicos por namespaces propios de cada robot, debido a que en un principio cada robot posee tópicos con el mismo nombre y en caso de no usarse los namespace para diferenciar a los tópicos, resultaría muy complejo controlar los robots de forma individual, ya que no se podría distinguir si la información es enviada al líder o es enviada al seguidor.

### 3.5.3. Prueba A: Verificación de la matriz de fuerza

El objetivo es verificar si la matriz de fuerza fue hecha de manera correcta, comprobándola con un código que reconstruye la trayectoria a partir de la matriz; si la trayectoria tiene la forma original, se puede decir que fue hecha correctamente. Las *Figuras 3.30, 3.31 y 3.32* muestran la reconstrucción de la trayectoria, mientras que las *Figuras 3.33, 3.34 y 3.32* muestran la trayectoria original.

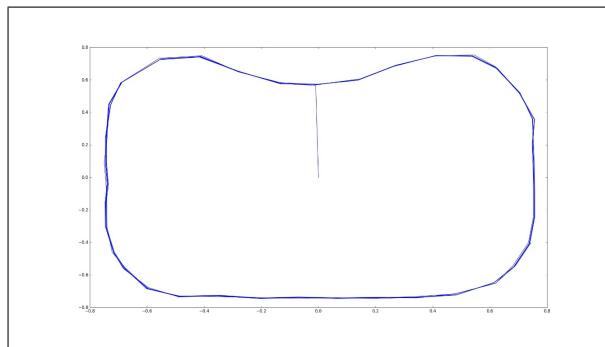


Figura 3.30: Reconstrucción de la trayectoria A.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

89%

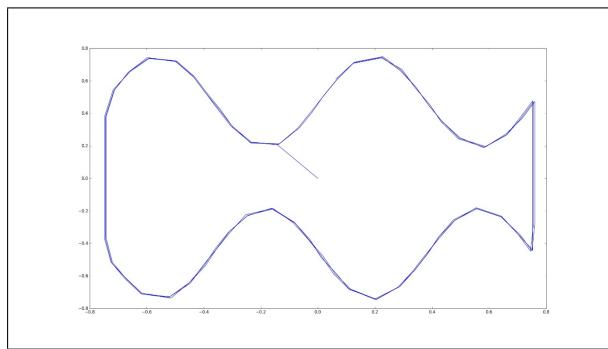


Figura 3.31: Reconstrucción de la trayectoria B.

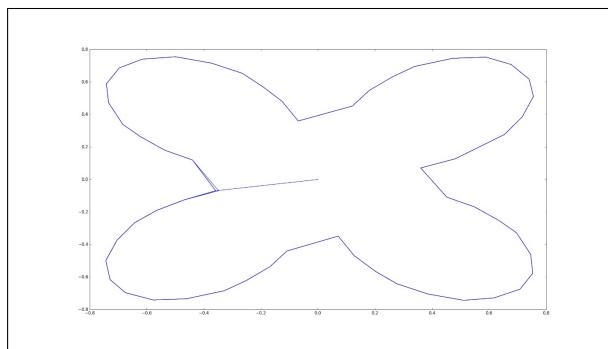


Figura 3.32: Reconstrucción de la trayectoria C.

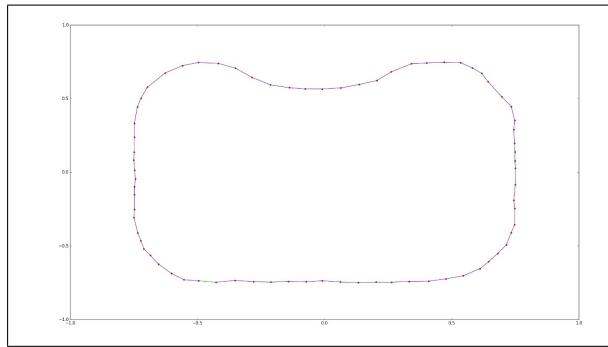


Figura 3.33: Puntos de trayectoria A.

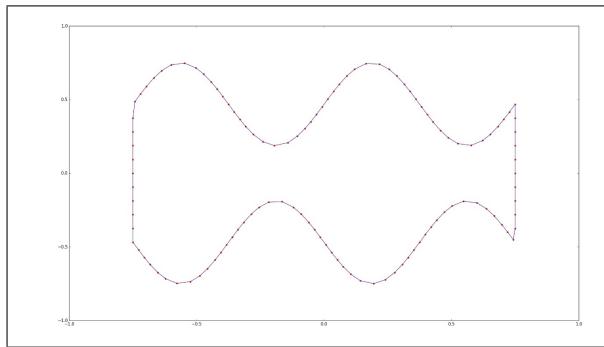


Figura 3.34: Puntos de trayectoria B.

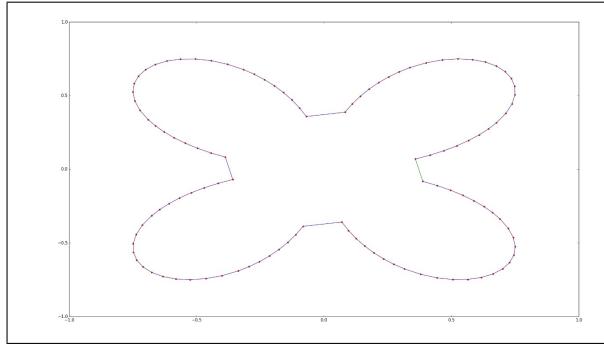


Figura 3.35: Puntos de trayectoria C.

### 3.5.3.1. Análisis de resultados

En las *Figuras 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34* y *3.35* se puede observar que la reconstrucción conserva la forma de la trayectoria, lo cual indica que las matrices están hechas correctamente.

### 3.5.4. Prueba B: Validar el seguimiento de trayectoria

Una vez verificada la matriz de fuerzas, se procede a la verificación del seguimiento de trayectoria. La prueba se hace en Gazebo como primera instancia para saber si el algoritmo funcionaba correctamente, pudiéndose apreciar visualmente como el robot sigue la trayectoria de manera adecuada, para posteriormente realizar la prueba física.



ca. Una vez hecho esto, se ejecute el programa con “`roslaunch esquema_lider_seguidor lider.launch`” por medio de la computadora remota iniciando la recabación de datos de las posiciones con el comando, “`rosrecord tb3_0/amcl_pose tb3_1/amcl_pose`”. Los datos que se recabados son usados para calcular el error que existe entre los puntos por cuales fue definida la trayectoria originalmente y los puntos por los que el robot pasó realmente, mostrados en las *Figuras 3.36, 3.37 y 3.38*.

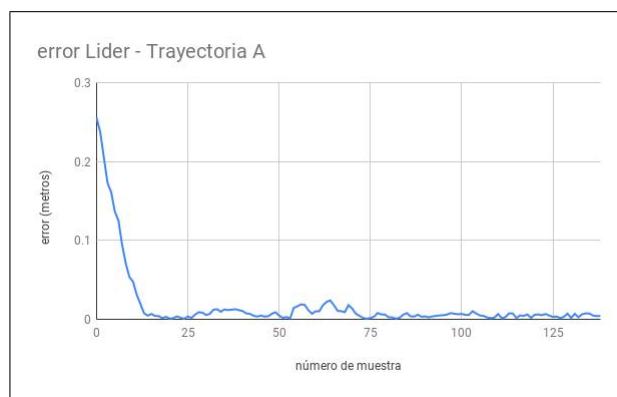


Figura 3.36: Error del líder en seguimiento de la trayectoria A.

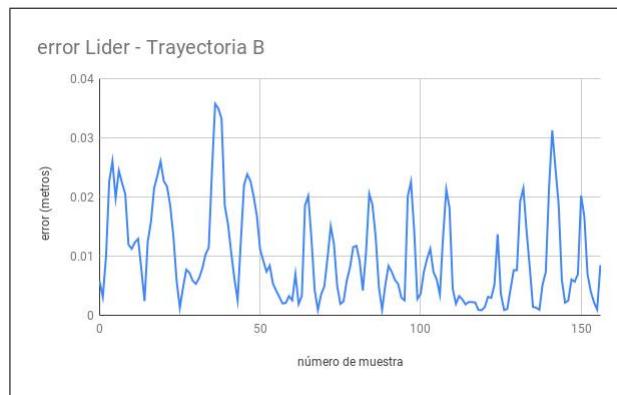


Figura 3.37: Error del líder en seguimiento de la trayectoria B.

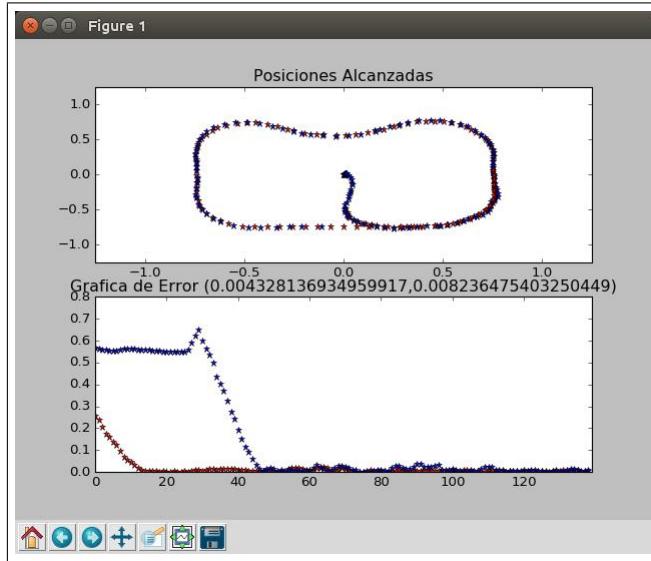


Figura 3.38: Gráfica de las posiciones alcanzadas y el error.

### 3.5.4.1. Análisis de resultados

Se observa en las *Figuras 3.36, 3.37* y *3.38* como el error disminuye y posteriormente se mantiene dentro de un umbral de 7 cm, indicando que el seguimiento de trayectoria efectivamente es ejecutado y realmente se hace un seguimiento de trayectoria.

### 3.5.5. Prueba C: Validar el algoritmo Líder-Seguidor

En las pruebas de la simulación del algoritmo líder-seguidor, se puede ver como el robot seguidor en ocasiones realiza los movimientos del líder con un desfase en la posición, por lo que se aplica una condición de distancia mínima para permitir cambiar la dirección del robot, una vez actualizada la posición del seguidor, logrando así un mejor seguimiento de los puntos de coordenada y sin afectar por su posición actual.

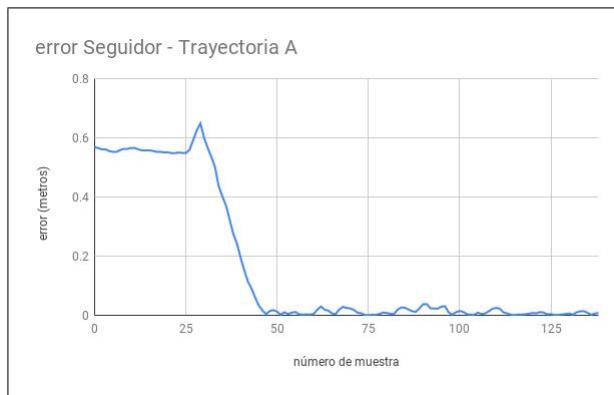


Figura 3.39: Error del seguidor en la trayectoria A.

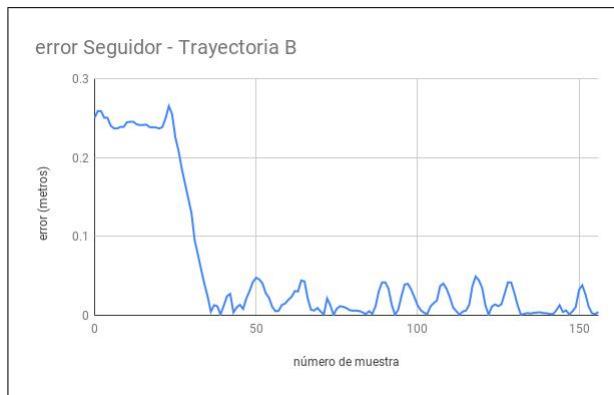


Figura 3.40: Error del seguidor en la trayectoria B.

### 3.5.5.1. Análisis de resultados

Se toman nuevamente los datos de posición, en este caso las del seguidor *Figuras 3.39 y 3.40*, y de igual manera, se obtiene un error respecto a la trayectoria. Dicho error valida que tan efectivo es el seguimiento de la trayectoria por parte del robot seguidor.

### 3.5.6. Prueba D: Validar la evasión de obstáculos

El algoritmo para la evasión de obstáculos se volvió la parte más compleja durante la implementación, debido a que, al haber reducido el área de trabajo propuesta



en dimensiones por cuestiones de espacio en el área de trabajo real, los robots no lograba esquivar los objetos de manera correcta. El problema radicó en que todas las paredes del espacio de trabajo eran leídas como obstáculos y no se lograba establecer un camino adecuado para la evasión. Para solucionar esta problemática se creó un nodo adicional, encargado de calcular una distancia mínima para ciertos ángulos del robot, informándole al nodo principal si se debía leer o no el Histograma, para posteriormente aplicar el algoritmo Vector Field Histogram (VFH).

La forma de verificar el funcionamiento del código es a través de Gazebo, el cual inicializa el nodo y posteriormente corroboraba la información que envía el nodo con las posiciones de los obstáculos.

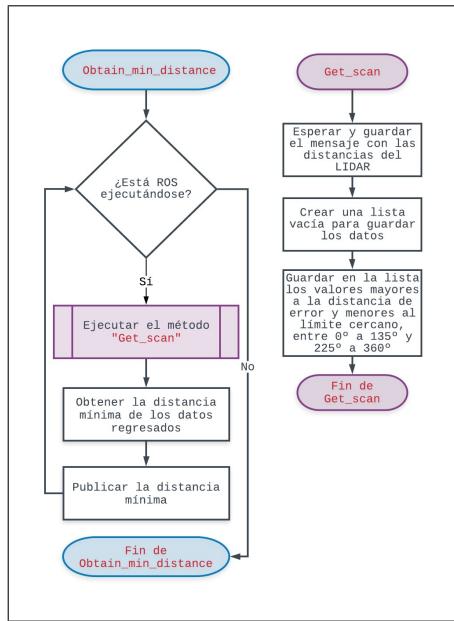


Figura 3.41: Método para calcular la distancia mínima y publicarla.

En el programa donde se implementó el VFH fue necesario validarlo colocando obstáculos en el ambiente de simulación, y corroborando que el histograma efectivamente reflejara la posición angular de los obstáculos respecto al robot. Las *Figuras 3.42 y 3.43* muestran los resultados las pruebas.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

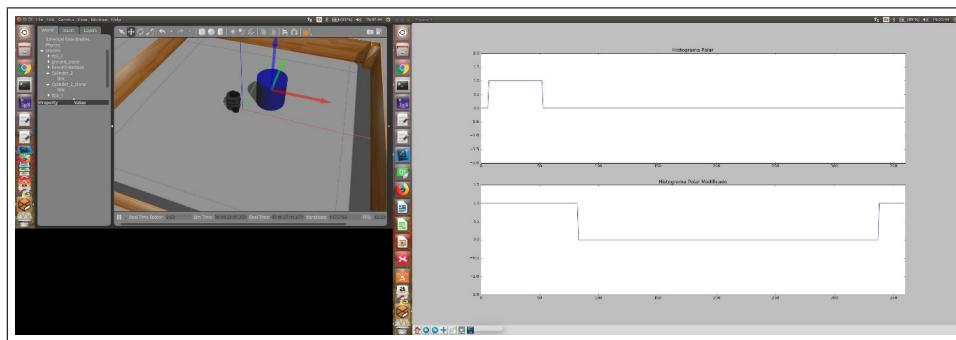


Figura 3.42: Detección del obstáculo cercano colocado en el primer cuadrante.

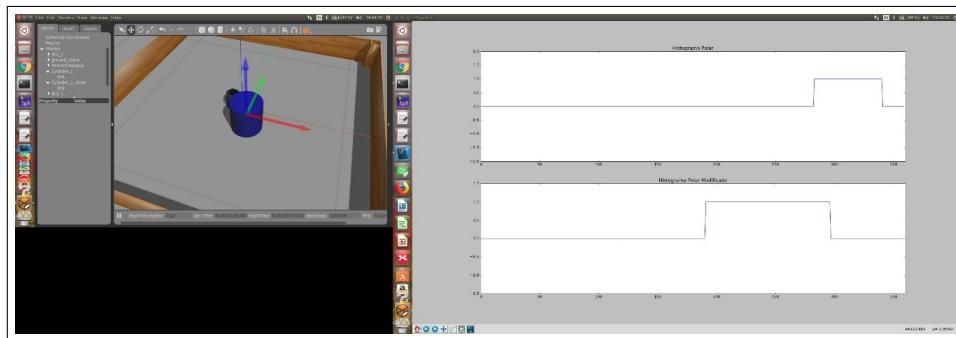


Figura 3.43: Detección del obstáculo cercano colocado en el cuarto cuadrante.

Al integrar los nuevos nodos junto con el código del seguimiento de trayectoria, es necesario primeramente implementar la matriz de fuerza que permite al nodo saber la orientación que debe tomar el robot, de tal manera que este pueda mantenerse dentro de la trayectoria propuesta. Este algoritmo es programado en un método llamado “Follow” mostrado en la *Figura 3.44*. Una vez conocida la posición, se discretiza en una matriz para poder ser accedida, dado que es una matriz discretizada para evitar un error de índices en la programación, se definen los límites máximos y mínimos, tomando en cuenta las dimensiones del mapa. Con los índices definidos se procede a extraer la diferencia entre el punto de origen del robot y el punto al que se desea llegar, en caso de que no se haya seleccionado una trayectoria el robot se detiene.

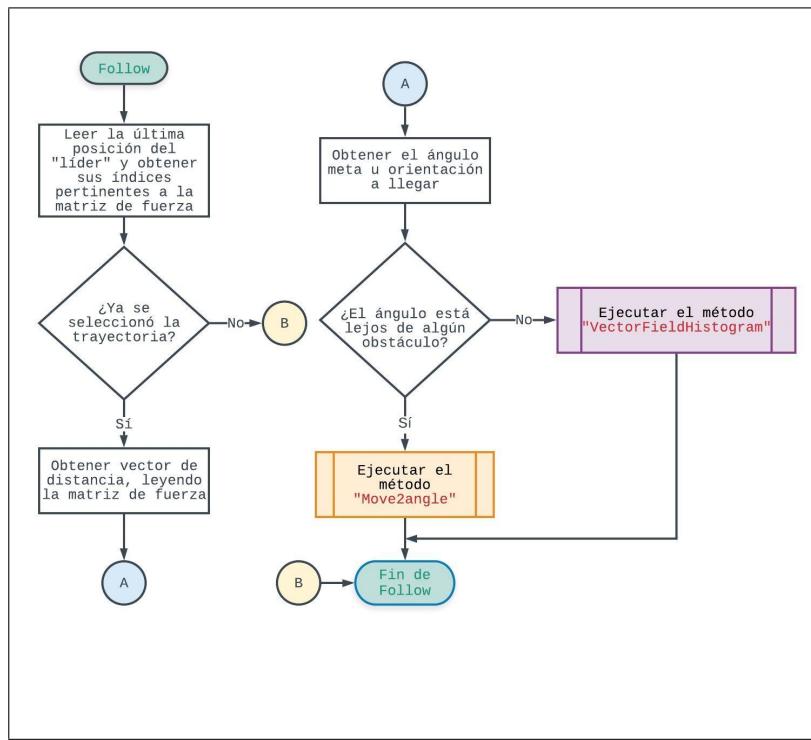


Figura 3.44: Función Follow para ejecutar VFH o seguimiento de trayectoria.

Para incluir el algoritmo encargado de la evasión de los obstáculos, se propone obtener una distancia mínima como la mostrada en la *Figura 3.41*, con la cual se decide si se inicia la evasión o no. En caso de tenerse una distancia mayor a la propuesta, se ejecuta el algoritmo de la *Figura 3.45*, el cual tiene como propósito el alineamiento del ángulo deseado, con la orientación propia del robot para posteriormente comparar dicho ángulo con su complemento y así determinar el sentido en el que debe girar el robot.

Debido a que el sistema puede dar oscilaciones muy grandes y con esto dañar los motores, se incluyen condiciones para que la velocidad angular quede dentro de un margen, de tal manera que si es muy grande el ángulo de error ( $45^\circ$ ) la velocidad lineal se vuelve cero, garantizando la rotación en su propio eje para cambios angulares grandes. Estas velocidades son publicadas para que el robot tome estos valores de velocidad.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

89%

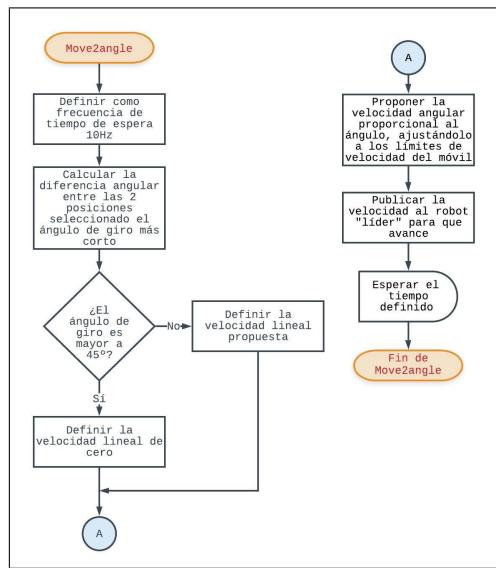


Figura 3.45: Función de seguimiento de trayectoria por dirección.

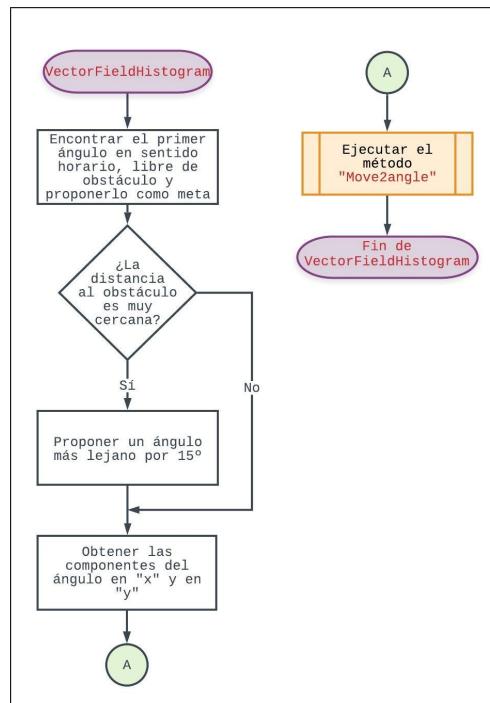


Figura 3.46: Algoritmo para aplicar VFH.



En el caso de que la distancia sea menor a la propuesta, como se muestra en la *Figura 3.46* se verifica si no hay un obstáculo en la dirección por la que el robot debe pasar, de no haber obstáculo sobre el ángulo deseado, se ejecuta la rutina anterior con el mismo ángulo indicado por la trayectoria, en caso contrario, se hace un mapeo antihorario y con 15° más (para evitar posibles futuras colisiones), con el objetivo de encontrar algún otro camino libre y alinear a los robots con base en la nueva trayectoria, publicando la nueva velocidad.

### 3.5.6.1. Validación de seguimiento y evasión

La forma de validar los algoritmos de seguimiento de trayectorias consiste en una serie de pasos; inicialmente los robots fueron simulados en un ambiente virtual (*gazebo*), que incluye información sobre el espacio físico y funcional de los TurtleBot3 burger, igualando a las condiciones reales. La inspección a la prueba consiste en observar el comportamiento de los robots en la simulación, dando especial énfasis al seguimiento de la trayectoria, que de no colisionar con ningún obstáculo virtual que pudiera haber en el camino, se confirma que todo ha sido realizado de manera correcta para posteriormente llevar a cabo las pruebas físicas. Durante las pruebas físicas se guardan los datos de posición, que, junto con los datos de la trayectoria a seguir, y aplicando un algoritmo basado en un árbol kd se obtiene un error que valida la operación.

Finalmente, para validar el algoritmo de evasión de obstáculos se colocan dos obstáculos en la zona de pruebas y se ejecuta el algoritmo de seguimiento de trayectoria, el algoritmo líder-seguidor y el algoritmo evasión. Para cada trayectoria los robots dan 3 recorridos, si falla únicamente una sola vez se considera exitoso.

### 3.5.7. Prueba E: Validar la integración de evasión y seguimiento

El objetivo de esta prueba es validar el funcionamiento del sistema en conjunto; el algoritmo líder-seguidor y el algoritmo de evasión, realizándose una serie de pruebas en el ambiente real, que consisten en colocar a ambos robots (a medio metro de distancia entre ellos) y dos obstáculos en posiciones de la trayectoria por las que el robot líder debe de pasar. Debido al seguimiento de trayectoria, se realiza 3 recorridos para cada trayectoria, en donde si únicamente colisiona una vez por trayectoria, se considera válido. En las *Figuras 3.47* y *3.48* se muestra el error obtenido en esta prueba.

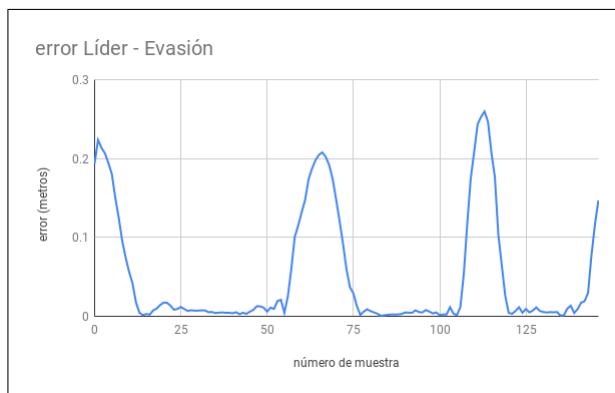


Figura 3.47: Error del robot líder durante la evasión.



Figura 3.48: Error del robot seguidor durante la evasión.



### 3.5.7.1. Análisis de resultados

Como se puede observar en las *Figuras 3.47 y 3.48*, el error disminuye cuando se mantiene dentro de la trayectoria y aumenta cuando se requiere alejarse e iniciar la evasión. Para ambos robots el comportamiento es el mismo, lo cual valida que realmente existe una evasión, ya que el robot líder toma como prioridad el no chocar que el de mantenerse sobre la trayectoria.

### 3.5.8. Realización de la HMI

Para lograr que el sistema tenga una mejor interacción con el usuario, se lleva a cabo la implementación de una interfaz gráfica HMI (*Human Machine Interface*), con el fin de que usuario puede interactuar con los robots y comunicarles que acciones tomar (como la selección de la trayectoria a seguir).

Dadas estas características, se utiliza el ambiente de trabajo *QtCreator* en el cual además de tener una extensa documentación e información de ayuda, ha sido utilizado para desarrollar una de las principales herramientas para el análisis de la información que posee el ecosistema de ROS, logrando que por medio de una interfaz *rqt* realizada en *Qt*, la visualización de las conexiones entre nodos, los valores de los distintos tópicos, el mando información con el fin de probar las diferentes variables de los tópicos, la graficación de la información de los nodos a través del tiempo, entre muchas otras funciones.

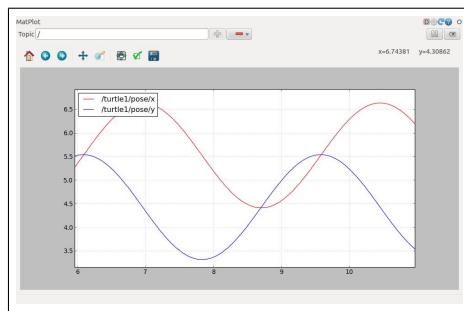


Figura 3.49: RQt para graficar distintos tópicos con respecto al tiempo.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

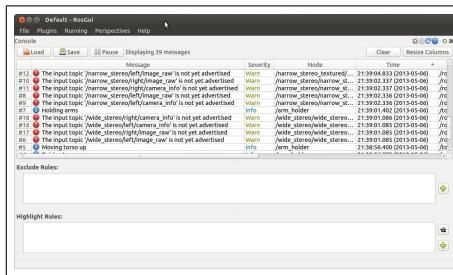


Figura 3.50: RQt mostrando y filtrando los distintos tipos de mensajes.

Con el objetivo de usar Qt, dada su versatilidad con ROS como herramienta gráfica para mandar órdenes a los robots líder y seguidor, se hacen uso de los siguientes paquetes:

- qtcreator
- ros-kinetic-qt-create
- ros-kinetic-qt-build

Para la instalación de Qt Creator en una computadora con Ubuntu 16.04, se hacen uso de las siguientes instrucciones en la terminal de comandos de Ubuntu.

- sudo apt-get install qtcreator
- sudo apt-get install ros-kinetic-qt-create
- sudo apt-get install ros-kinetic-qt-build

Una vez instalado se crean los paquetes que se describen en la página web de ROS, en la sección *qt\_build* [36]. Cabe mencionar que para generar el paquete de ROS relacionado con la interfaz se hace uso de la instrucción en la terminal para la carpeta catkin\_ws de la siguiente forma.

- catkin\_create\_qt\_pkg gui\_lider\_seguidor



Donde “*catkin\_create\_qt\_pkg*”, es la instrucción para generar el paquete y “*gui\_lider\_seguidor*”, es el nombre del paquete asignado por el usuario.

Una vez compilado correctamente el paquete de la interfaz, se puede compilar como cualquier otro paquete usando la instrucción *catkin\_make* y si esta instrucción realiza la compilación correctamente entonces se puede editar y compilar el proyecto usando qtcreator. Para esto se ejecuta en la terminal el comando *qtcreator* y este comando abre el programa qtcreator como se muestra en la *Figura 3.57*.

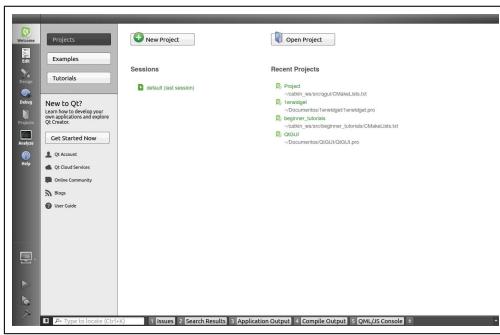


Figura 3.51: Pantalla de bienvenida de QtCreator.

Una vez dentro del programa, se abre el proyecto dando clic en “File” luego “Open File or Project”, abriéndose un archivo “CmakeList.txt” del paquete creado, en este caso “*gui\_lider\_seguidor*”, como se muestra en la *Figura 3.52*.

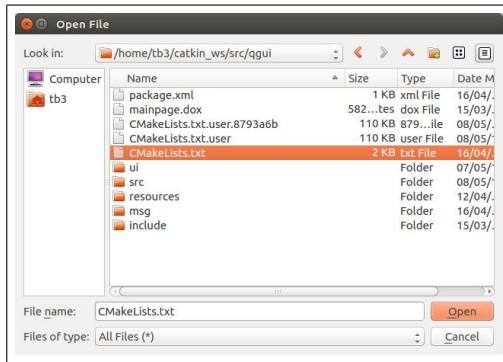


Figura 3.52: Ventana para compilar paquete en QtCreator.



Posteriormente se abre una ventana para elegir las opciones de compilación donde se selecciona la carpeta en la cual se guardará la compilación, aquí se selecciona la carpeta “build” dentro de la carpeta “catkin\_ws”, como se muestra en la *Figura 3.53*.

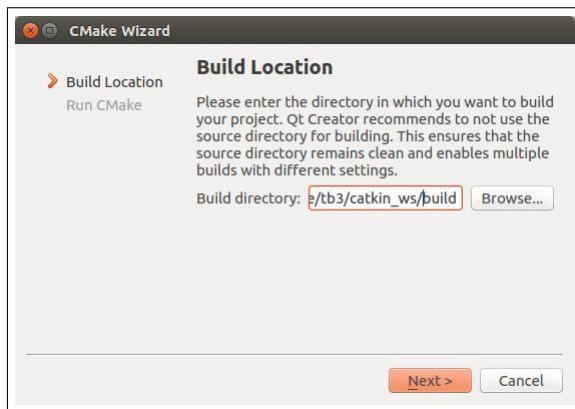


Figura 3.53: Ingreso de la carpeta de compilación.

Al darle “next”, aparecerá una ventana que pide el comando de compilación cmake, para que compile se le ingresa el siguiente comando en “Arguments”, el cual le indica como y donde compilar:

- `cmake .. /src -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=.. /install -DCATKIN_DEVEL_PREFIX=.. /devel`

Este comando se puede consultar más a detalle en la sección “catkin\_make” de la wiki de ROS [35].

Posteriormente se le da clic en el botón “Run CMake”, compilando el proyecto con esta acción y al darle “Finish” abriéndose los archivos relacionados con el proyecto si se compiló correctamente para poderse editar, como se muestra en la *Figura 3.54*.

## Integración del Sistema

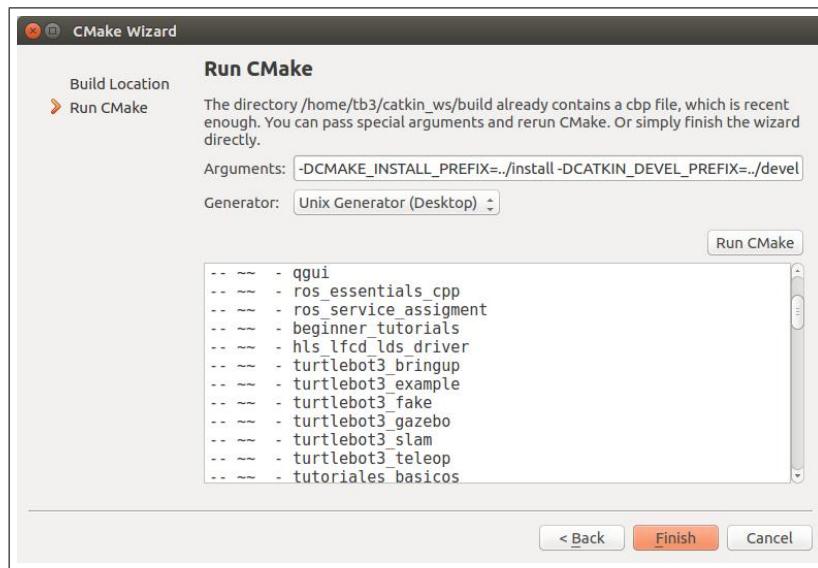


Figura 3.54: Ingreso y compilación con el comando CMake.

Una vez realizado esto exitosamente, se muestra una ventana como la de la *Figura 3.55*. Cabe mencionar que este procedimiento se puede aplicar para cualquier paquete de la carpeta “catkin\_ws”.

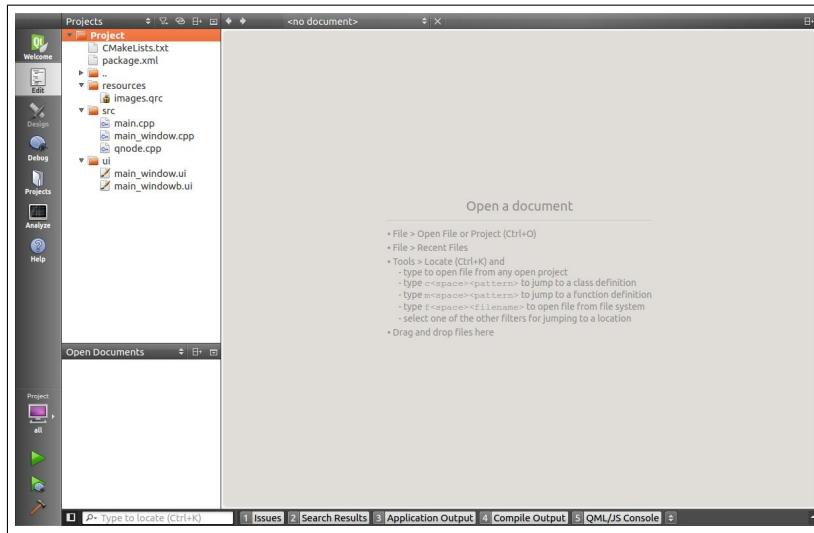


Figura 3.55: Ventana en Qt con el paquete qgui.

La edición del paquete se describe a detalle en la wiki de ROS, sección de “qt\_build”<sup>[36]</sup>, pero en resumen se divide en 4 partes.

- El programa principal del proyecto.
- El programa de la funcionalidad del código de la ventana gráfica.
- El programa de las funciones para interactuar con ROS.
- El framework para realizar la edición de la HMI gráficamente.

Estos 3 programas y el framework de edición, trabajan en conjunto y cada uno está contenido dentro de otro de mayor nivel como se explica a continuación.

#### 3.5.8.1. Programa Principal

El programa principal se encarga de crear el objeto de la ventana y que esta sea visible, además que cuando esta se cierra da la indicación que el programa ha terminado, esto al igual que los demás programas anteriormente mencionados también usa hilos de ejecución por medio de la librería QThread, para que puedan ejecutarse varios procesos a la vez dentro de un mismo código, logrando de tal forma que el usuario pueda interactuar con la interfaz al mismo tiempo que esta realiza distintos cálculos o envía mensajes al ecosistema de ROS en los tiempos adecuados. Este programa en general contiene todo porque de aquí llaman a los demás programas anteriormente mencionados.

#### 3.5.8.2. Ventana Gráfica

Este programa muestra la interfaz gráfica creada en el framework de edición de Qt y al ser un programa de c++ se compone de 2 archivos el “*main\_window.cpp*”, y el “*main\_window.hpp*”. En el primero se le informa que variables van a existir dentro de la clase y que métodos se van a definir y en el segundo se le da la funcionalidad a cada uno de los métodos, del tal manera en esta parte del programa se programan que



acciones van a realizar los elementos colocados en la interfaz gráfica, por ejemplo cuando se selecciona una opción de la trayectoria en la interfaz creada para este proyecto se muestra una imagen de la trayectoria, implicando esto que al inicializarse esta ventana lee la imagen y luego la guarda para después mostrarla y en general este proceso de lectura, guardado y ejecución se implementa a lo largo de todo este programa. Cabe mencionar que este programa es afectado por lo que se edita en el framework o editor de la interfaz gráfica y este programa de la ventana gráfica está contenido dentro del Programa Principal.

### **3.5.8.3. Programa de ROS**

Este programa al igual que el anterior se compone de 2 archivos el “*qnode.cpp*”, y el “*qnode.hpp*”, los cuales hacen una clase dando funcionalidad y manejan definiciones de la clase respectivamente. En cuanto a lo que realiza este programa es inicializar la comunicación con ROS cuando le es pedido desde la interfaz gráfica, lo cual al ser manejado por un hilo de ejecución no bloquea la interfaz gráfica, también aquí se crea el nodo para trabajar con ROS, se definen a que tópicos se suscribe este nodo, que tópicos publica y además se definen métodos públicos que pueden ser llamados por la interfaz gráfica para realizar una cierta acción en el entorno de ROS. Cabe mencionar que este programa está contenido dentro del programa de la ventana gráfica y por defecto contiene el sistema de llamado de mensajes de consola de ROS.

### **3.5.8.4. Framework de Trabajo**

El framework de trabajo es una herramienta muy útil, ya que se puede editar fácilmente y de manera interactiva como se visualizará la interfaz, destacando 2 ventajas: la primera que queda visualmente como se bosqueja la interfaz gráfica en vez de modificar posiciones o contenedores para que se ajusten y la segunda que sin un gran conocimiento de todas las librerías de la interfaz gráfica se puedan usar los elementos provistos por el framework que además de todo mejoran los tiempos



de desarrollo de la interfaz, ya que se auto genera el código de la visualización de la interfaz y solo queda por programar su funcionalidad. Cabe mencionar que este framework crea un archivo que está contenido en el programa de la ventana gráfica para que los elementos queden justo como en el editor de la interfaz el cual se muestra en la *Figura 3.56*.

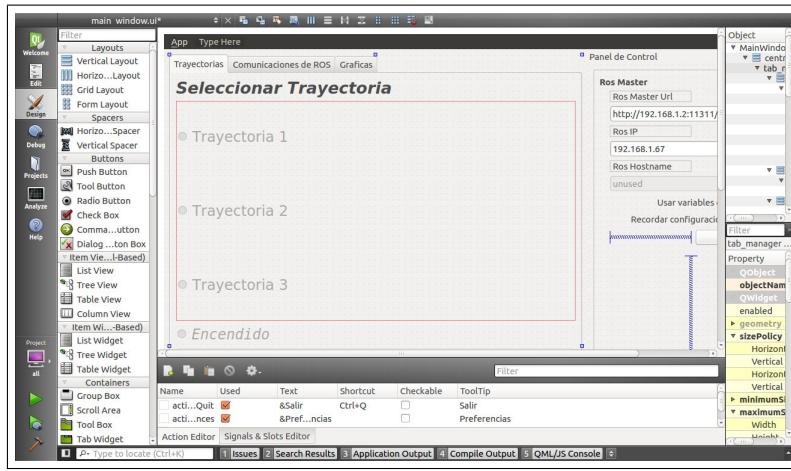


Figura 3.56: Framework de Qt para GUI.

### 3.5.8.5. Puntos importantes a considerar

Como recomendación se propone primero editar la interfaz gráfica sin intentar añadir un slot (método a ejecutar cada que hay un evento en cierto elemento de la interfaz; por ejemplo, darle clic a un pushbutton) a los componentes, ya que daña el proyecto al generar código erróneo, posteriormente compilarlo y después con este procedimiento ya aparecerán los nuevos componentes reconocidos automáticamente por el sistema para así realizar una mejor edición del código. En el caso de usar slots para darle funcionalidad a cada componente se recomienda conectarlos manualmente como se muestra en la siguiente instrucción:

- `QObject::connect(ui.pushButton_Graficar, SIGNAL(clicked()),`
- `this, SLOT(pushButton_Graficar_clicked()));`



Donde “*ui.pushButton\_Graficar*”, es el botón en la interfaz gráfica, “*clicked()*”, es la acción de darle clic a ese botón y “*pushButton\_Graficar\_clicked()*”, es la acción que se ejecutará al darle clic en el botón “*ui.pushButton\_Graficar*”.

### 3.5.8.6. Modificación del Programa

Dado que este paquete ya viene con una funcionalidad predeterminada, se modifica el código base, así como también la interfaz gráfica para ajustarlo a los requerimientos del trabajo, con lo cual, siguiendo la lógica del programa descrita anteriormente, se consigue enviar los tópicos necesarios para que se logre la interacción con los robots y la graficación. Los tópicos que se crean para dar dicha funcionalidad son los siguientes:

- lane de tipo std\_msgs::Int32 para seleccionar la trayectoria.
- turn\_on de tipo std\_msgs::Bool para decidir si los móviles avanzan.
- graph de tipo std\_msgs::Bool para decidir si se grafica.
- clear\_graph de tipo std\_msgs::Bool para limpiar la gráfica y puntos almacenados.
- save\_data de tipo std\_msgs::Bool para guardar los datos graficados.

### 3.5.8.7. Resultados de la ejecución

A continuación, se muestran los resultados de la ejecución de la interfaz, donde destacan 3 ventanas principales.

- Ventana para elegir trayectoria y encender o apagar al robot.
- Ventana para visualizar el historial de la trayectoria elegida.
- Ventana para graficar, limpiar gráficas o guardar datos.

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento



En la primera ventana como se muestra en las *Figuras 3.57* y *3.58* se elige la trayectoria deseada por el usuario pudiéndose ver la imagen de la trayectoria a seguir, sin embargo esta es cargada hasta que se presiona el botón *cargar trayectoria*.

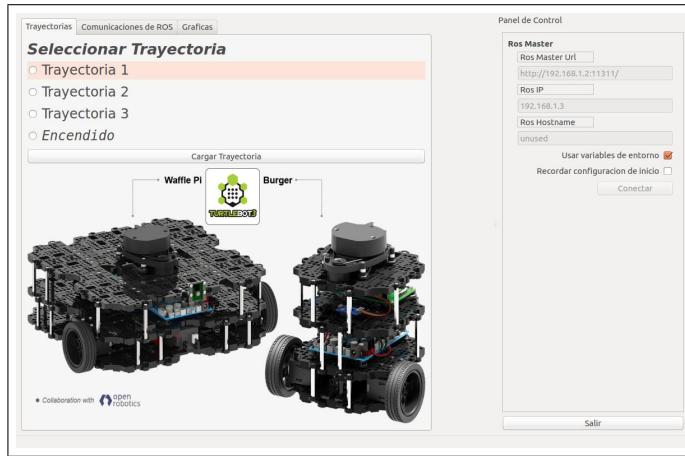


Figura 3.57: Ventana inicial de la interfaz.

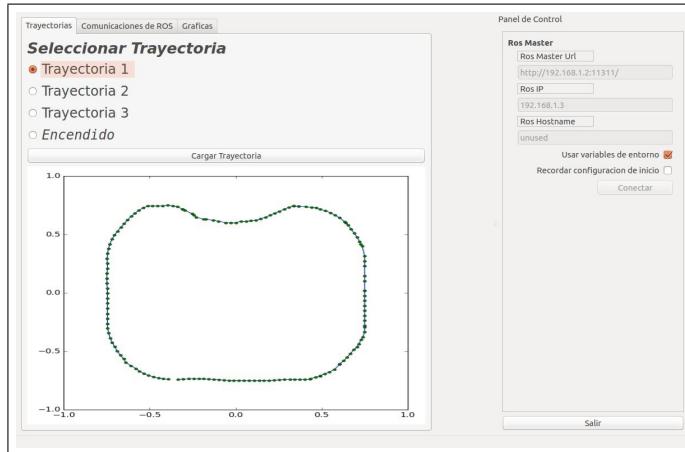


Figura 3.58: Configuración de la interfaz con la trayectoria 1 seleccionada y apagada.

Para darle a los robots la instrucción de “avanzar”, se selecciona la opción encendido apareciendo en ese momento la opción marcada, comenzando los robots a seguir la trayectoria escogida como se muestra en las *Figuras 3.59* y *3.60*, para apagarlo basta con volver a presionar el botón.

## Integración del Sistema

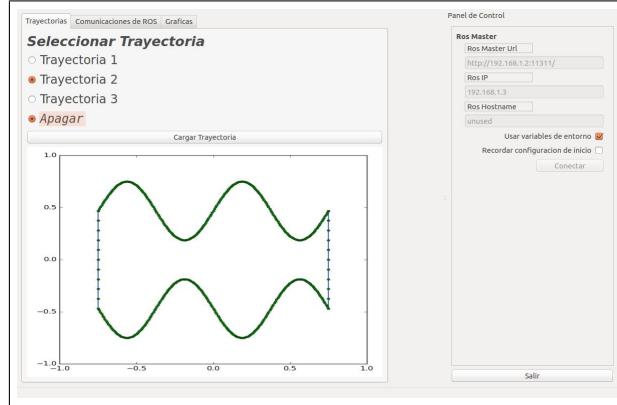


Figura 3.59: Configuración de la interfaz con la trayectoria 2 seleccionada y encendida.

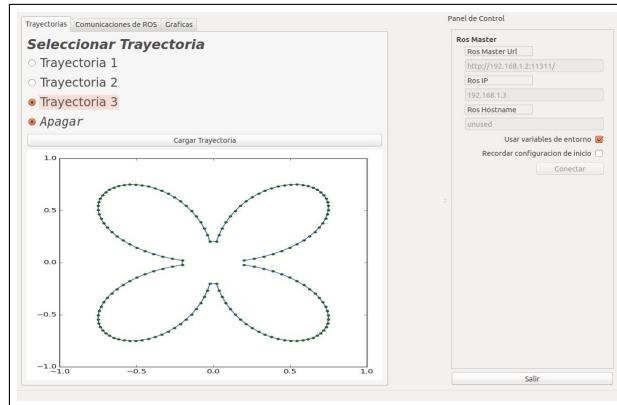


Figura 3.60: Configuración de la interfaz con la trayectoria 3 seleccionada y encendida.

En la segunda ventana se muestra el historial de todas las trayectorias cargadas, así como los mensajes de prueba para verificar que la interfaz este enviando bien la información a través de ROS (*Figura 3.61*) sin nunca haberse cargado alguna trayectoria y en la *Figura 3.62* con un historial de trayectorias cargadas (donde además se puede consultar cual es la trayectoria a seguir actualmente).

### 3.5 Implementación del Área Funcional Procesamiento

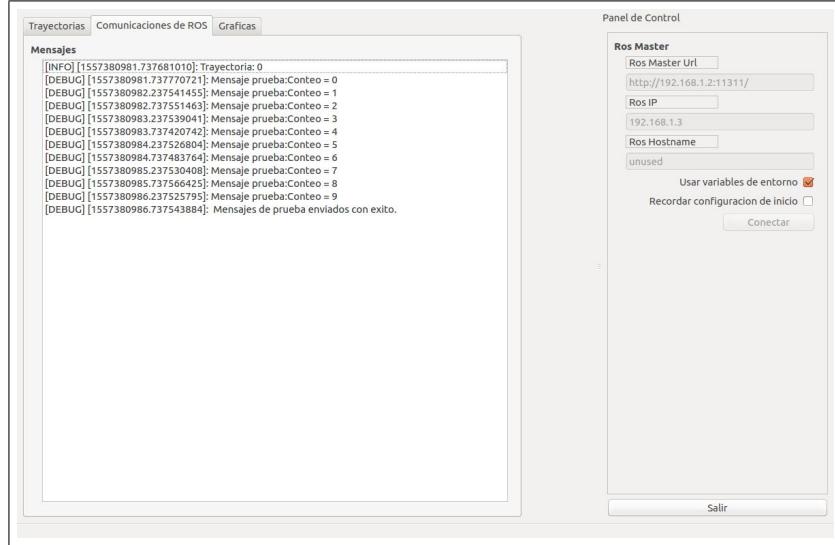


Figura 3.61: Interfaz con los mensajes de prueba enviados.

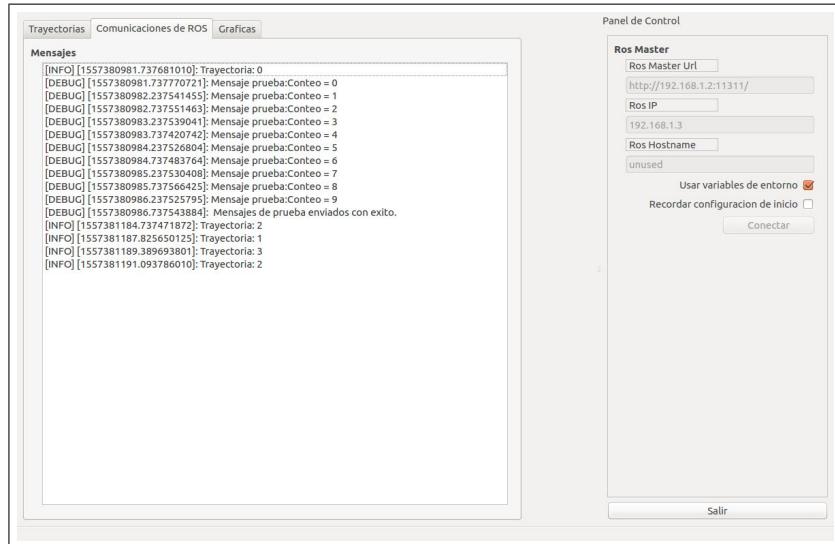


Figura 3.62: Interfaz con el historial de trayectorias seleccionadas.

En la tercera ventana como se observa en la *Figura 3.63* se dan las opciones para controlar la graficación. Si se quiere limpiar la gráfica para realizar varios guardados sin repetir la información, y para guardar los datos de los valores de posición y error en un archivo con formato .npy y .xlsx .

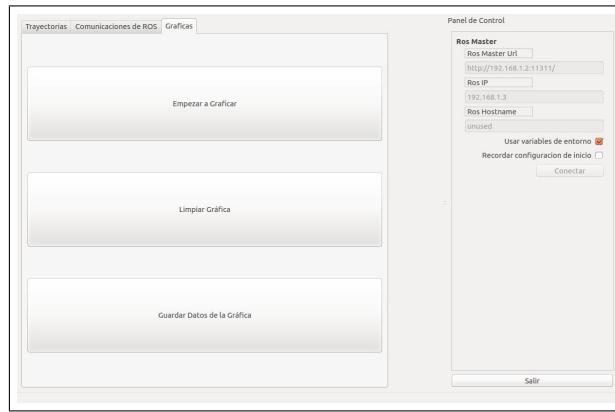


Figura 3.63: Interfaz mostrando las opciones de graficación.

## 3.6. Especificaciones del Sistema

En esta sección se habla de las especificaciones de algunos de los componentes de cada área funcional como los tiempos de las baterías LiPo, los diagramas de nodos y las dimensiones del área de una manera breve.

### 3.6.0.1. Especificaciones del Área de Trabajo

El Área de Trabajo fue fabricada de MDF y sus dimensiones son las siguientes: 2.4m x 2.4m x .30m (Longitud - Ancho - Altura).

### 3.6.0.2. Especificaciones de la Alimentación

Cada batería de los robots dura aproximadamente *dos horas* de uso continuo, y tarda en cargarse aproximadamente *una hora y media*.

### 3.6.0.3. Especificaciones del Procesamiento

En la Figura 3.64 se muestran la red de nodos implementada para el proyecto.

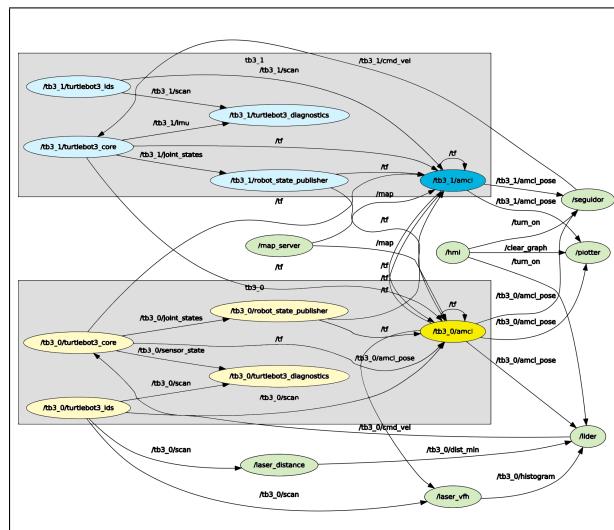


Figura 3.64: Nodos de Rosgraph.



---

## Análisis de Costo

---

### 4.1. Costos variables

Los costos variables corresponden a los costos directos involucrados en la producción y venta de un artículo. Alineándose al presente proyecto, no se cubrieron gastos por ventas, pero si por producción, derivándose en las siguientes dos categorías:

- Costos por materias primas.
- Costos por mano de obra directa.

Los *costos primarios* corresponden a los costos por materia prima directamente gastados. Ya que en este proyecto no se manufacturó ni tampoco se transformó el material, la materia prima corresponde a todo el material utilizado para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, abarcando desde la compra de los robots hasta la compra de tornillos, pegamento, etc.



Articulo	Cantidad	Precio unitario	Precio total
TurtleBot3 Burger	2	590 USD*	1180 USD*
Teclado y mouse Logitech	2	343.97 MXN	687.80 MXN
Cargador Energizer	1	206.03 MXN	206.03 MXN
Plan de remplazo	2	68.10 MXN	136.20 MXN
Adaptador de HDMI a VGA	2	188.70 MXN	188.70 MXN
Baterías	1	76.73 MXN	73.73 MXN
Placas de madera	3	170.00 MXN	510.00 MXN
Tira de pino	6	25.00 MXN	150.00 MXN
Otros (tornillos, pegamento, etc)	n	150.00 MXN	150.00 MXN
Total			24,808.75 MXN

Tabla 4.1: Tabla de costos variables.

\*La compra de los TurtleBot3 Burger se realizó el 14 de septiembre de 2018, ese día el tipo de cambio correspondió a 19.24 pesos mexicanos por cada dólar estadounidense.

## 4.2. Costos fijos

Los *costos fijos* se presentan a continuación considerando las horas trabajadas.

TT1	Total de días trabajados	Horas trabajadas por día
	85	3
Total de horas trabajadas		255

Tabla 4.2: Días trabajados en TT1.



TT2	Total de días trabajados	Horas trabajadas por día
	95	4
Total de horas trabajadas		380

Tabla 4.3: Días trabajados TT2.

Total de días trabajados	180 días
Total de horas trabajadas	635 horas

Tabla 4.4: Total de días y horas trabajadas.

Nota: El total de días trabajados es ideal, ya que únicamente se están contabilizando los 5 primeros días de la semana, sin contar fines de semana, ni vacaciones, aunque se haya trabajado en fines de semana y vacaciones. Este análisis se hizo basándose en el calendario del Instituto Politécnico Nacional (semestres 2019 -1 y 2019 -2).

Los costos fijos son costos periódicos, es decir, suelen incurrirse a ellos por medio del tiempo transcurrido, como lo sería costos por renta, mantenimiento, etc., pero como en este caso, no se cubrieron ninguno de esos gastos porque fueron gastos cubiertos por el Instituto Politécnico Nacional, se consideran como gastos fijos, los gastos de transporte, comidas, y tiempo de estancia en la escuela por todos los miembros del equipo.

Tipo de gasto	Gasto por día [MXN]	Gasto por el total de días trabajados (180)
Pasajes	\$140.00	\$25,200.00
Comidas	\$160.00	\$28,800.00
Otros gastos	\$15.00	\$2,700.00
TOTAL		\$56,700.00 MXN

Tabla 4.5: Costo total de gastos fijos.



### 4.3. Costo total

El *costo total* del proyecto corresponde a la suma del *costo fijo* más la suma del *costo variable*.

$$\text{Costo total} = \text{Costo fijo} + \text{Costo variable}$$

Costo total del proyecto = **\$81,508.75.00**

Este es el *precio neto* del proyecto, por lo que si se pensara en comercializarlo, se le podría agregar un porcentaje de ganancia con base en el costo total de proyecto.

---

## Conclusiones

---

La sinergia de todos los diseños, diagramas, códigos y pruebas dieron como resultado el correcto funcionamiento e implementación de un control multirobot basado en un esquema líder-seguidor, implementado al seguimiento de trayectorias y a la evasión de obstáculos, dando por cumplidos los objetivos particulares orientados a la selección, implementación y construcción de los subsistemas que componen el proyecto. Se llevó a cabo la selección, acondicionamiento y ejecución correcta, de todos los sensores para la recabación de datos, así mismo, los diversos algoritmos fueron satisfactoriamente implementados para el adecuado comportamiento de los robots, estableciendo una comunicación entre el usuario y los robots, por medio de una interfaz gráfica capaz de desplegar información del sistema, así como también la selección de trayectorias, el encendido o apagado de los robots.

Respecto a la implementación del VFH (Vector Field Histogram) para la evasión de obstáculos, tuvo que ser modificada varias veces, ya que cada vez se buscó una mejor adaptación con el sensor LIDAR y la adición de nuevos factores, como el factor que aumentaba la dimensión de los obstáculos para evitar los choques debido a las dimensiones de los robots y el área de trabajo. La utilización de hilos de ejecución en la programación fue fundamental para el proyecto, ya que permitió realizar distintos



procesos de cómputo, aumentando la velocidad de respuesta del sistema y brindando movimientos fluidos a ambos robots, sin complicar la programación por la suma de otras acciones a ejecutar.

Al diseñar, desarrollar y realizar un sistema de control multirobot, se dejó como contribución, al alcance de la comunidad politécnica y de la sociedad, dos algoritmos totalmente funcionales, para su uso en diversas aplicaciones relacionadas con la robótica cooperativa. El primer algoritmo es el VFH implementado en ROS y en Python, haciendo uso únicamente de un sensor LIDAR, permitiendo su implementación en otros robots o sistemas. El segundo es el algoritmo líder-seguidor, pudiendo ser aplicado para más de dos robots o con distintas configuraciones motrices.

A continuación se detalla de mejor manera, las razones por las cuales se considera como “exitoso.<sup>el</sup> cumplimiento de cada uno de los objetivos particulares.

**Seleccionar y construir dos sistemas de locomoción para los móviles que les permita moverse en superficies y ambientes controlados.** Este objetivo se cumplió al analizar las distintas opciones disponibles de acuerdo al presupuesto económico y técnico, eligiéndose al TurtleBot 3 Burger como la mejor opción disponible de acuerdo a lo antes mencionado. La segunda parte del objetivo se cumplió al ensamblar y probar los 2 TurtleBot 3 Burger en una superficie de prueba. Se encuentran documentados los detalles de la implementación en la sección de Integración del área funcional *estructura*.

**Diseñar e implementar un control de seguimiento de trayectoria para el robot líder.** Este objetivo se cumplió al diseñar un algoritmo de seguimiento, el cual hizo uso de la matriz de fuerza para la correcta orientación de los robots, para así mantenerse sobre la trayectoria. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de *procesamiento*, puntualmente en las pruebas A y B.

**Diseñar e implementar un control de seguimiento al líder para el robot seguidor.** Este objetivo se cumplió al diseñar un algoritmo de seguimiento al líder, el cual hizo uso de la lista de puntos FIFO, cumpliendo con la función de orientar de manera correcta al seguidor, para así imitar la trayectoria realizada por el líder. La implementación fue hecha con el lenguaje de programación Python, ROS. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de *procesamiento*, específicamente en la prueba C.

**Establecer e implementar un método de comunicación apropiado para la configuración líder seguidor.** El método de comunicación entre los robots elegido fue ROS, permitiendo la fácil transmisión de mensajes personalizados, y entre distintas computadoras, apoyado del protocolo de la comunicación WiFi. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de procesamiento, específicamente la parte de comunicación.

**Diseñar e implementar un algoritmo para la evasión de obstáculos fijos.** El algoritmo fue diseñado a partir del VFH, el cual fue ajustado a los sensores y lenguajes de programación usados, que a su vez fueron parte de la implementación. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de *procesamiento*, específicamente en la prueba D.

**Seleccionar e implementar un sistema de sensado en el robot líder, para su propia localización y detección de obstáculos.** El sistema de sensado fue seleccionado juntos los robots móviles, la implementación consistió en lograr correctas mediciones para detectar obstáculos de forma correcta y lograr su localización donde la mayor parte del trabajo consistió en ajustes por medio de software. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de *percepción*.



**Seleccionar e implementar un sistema de sensado en el robot seguidor, para la identificación del líder.** El sistema de sensado fue seleccionado junto con los robots móviles, la implementación consistió en lograr correctas mediciones para localizar al líder, esta sección también fue en su mayoría ajustes por medio de software. Los detalles de implementación se mencionan en el área funcional de percepción.

**Diseñar e implementar una GUI para el monitoreo del sistema, la selección de una trayectoria a seguir y delimitar el área de trabajo.** El diseño de la GUI fue presentado durante la sección de diseño detallado y posteriormente modificada durante la implementación para mejorar el aspecto visual, concordando con las funciones del objetivo en cuestión. Los detalles de implementación se profundizan en la sección de Implementación titulada Realización de la HMI.

---

## Referencias

---

- [1] Allevato, A. (2019). Names. <http://wiki.ros.org/Names>.
- [2] Alvaro, G. (2013). Ros: Robot operating system. *Universidad Politécnica de Cartagena.*
- [3] Berlin, F. U. (2018). *Automodel Car.* Dahlem Center for Machine Learning and Robotics, Freie Universität Berlin. <https://github.com/AutoModelCar/AutoModelCarWiki/wiki/Navigation>.
- [4] Bishop, R. H. (2008). *The mechatronics handbook*. London.
- [5] Borenstein, J. and Koren, Y. (1991). The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):278 to 288.
- [6] Bugarin Carlos, E. and Aguilar Bustos, A. Y. (2014). Control visual para la formación de robots móviles tipo uniciclo bajo el esquema líder seguidor. *UNAM*.
- [7] Darpa (2007). Route network definition file (rndf) and mission data file (mdf) formats. *Grandchallenge*, 1:4 to 9. [https://www.grandchallenge.org/grandchallenge/docs/RNDF\\_MDF\\_Formats\\_031407.pdf](https://www.grandchallenge.org/grandchallenge/docs/RNDF_MDF_Formats_031407.pdf).

## REFERENCIAS

---



- [8] García Tovar, V. E., Guzmán Martínez, S., Pérez Nicolás, P., and Terán Chapul, R. E. (2017). Robot repartidor autonómico.
- [9] Gérard Bruno, o. H. (2005). *El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores*. PhD thesis, Univesidad Mayor de San Marcos. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano\\_hg/cap3.PDF](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF).
- [10] Gerkey, B. P., Lu, D. V., Ferguson, M., and Hoy, A. (2018). Amcl. <http://wiki.ros.org/amcl>.
- [11] GTK (2018). *Batería de polímero de litio*. Shenzhen Foxell Technologies Co., Ltd. <https://es.aliexpress.com/item/1-unids-11-1-V-5C-1800-mAh-li-po-bater-a-de-pol-mero-de/32830921404.html>.
- [12] Gutiérrez, J. (2014). Qué es un framework web. *ros.org*.
- [13] Harashima, F., Tomizuka, M., and Fukuda, T. (1996). *Mechatronics, What is it, why and how?* IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.
- [14] Jet (2017). Tx1 jet robot kit. <https://www.servocity.com/tx1-jet-robot-kit>.
- [15] Juárez Palafox, J., Muro Maldonado, D., and Franco González, A. (2005). Construcción y control de un robot móvil.
- [16] Juliá Cristóbal, M. (2005). Seguimiento de robots mediante visión artificial. aplicación al mantenimiento de formaciones basada en comportamientos.
- [17] Kumar, P. (2016). *Install Ubuntu*. <https://www.linuxtechi.com/install-ubuntu-16-04-with-screenshots/>.
- [18] Lagunes Fortiz, M. A. (2014). Sistema de navegación evasor de obstáculos en un robot móvil.
- [19] Madhevan, B. and Sreekumar, M. (2013). Tracking algorithm using leader follower approach for multi robots. *Procedia Engineering*, 64:1426 to 1435.

- [20] Molina Villa, M. A. and Rodríguez Vásquez, E. L. (2014). Flotilla de robots para trabajos en robotica cooperativa.
- [21] Petrinic, T. and Petrovic, I. (2013). A leader-follower approach to formation control of multiple non-holonomic mobile robots. In *2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, page 931 to 935.
- [22] Rangel, Cortina, A., Park, J. Y., and Lloyd (2016). Turtlebot 3 burger [us].
- [23] Raspberrypi.org (2013). *SSH (Secure Shell)*.  
<https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/ssh/>.
- [24] Ribeiro, M. I. (2005). Obstacle avoidance.  
<http://users.isr.ist.utl.pt/~mir/pub/ObstacleAvoidance.pdf>.
- [25] Riveros Guevara, A. and Solaque Guzmán, L. E. (2013). Formación de robots móviles mediante el uso de controladores. *USBMed*, page 63 to 64.
- [26] Ro-Botica (2016). *DYNAMIXEL XL430-W250*. Accensit.  
<http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl430-w250/control-table-of-eeprom-area>.
- [27] Ro-Botica (2018). *Motores DYNAMIXEL*. Accensit. <http://robotica.com/tienda/ROBOTIS-DYNAMIXEL>.
- [28] Robotis (2016a). *e-Manual Features*. <http://emanual.robotis.com>.
- [29] Robotis (2016b). *e-Manual specifications*.  
<http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/specifications/>.
- [30] Robotis (2016c). *install-ubuntu-on-remote-pc*. Jekyll and Minimal Mistakes. <http://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/pcsetup/install-ubuntu-on-remote-pc>.

## REFERENCIAS

---



- [31] Robotis (2016d). Raspberry pi 3 model b.  
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- [32] Robotis (2016e). *Robotis e-Manual*. <http://emanual.robotis.com>.
- [33] Robotis (2018a). *LIPOL Battery 11.1V*. Purdue University.  
<http://www.robotis.us/lipo-battery-11-1v-1800mah-lb-012/>.
- [34] Robotis (2018b). Opencr. <http://emanual.robotis.com/docs/en/parts>.
- [35] ROS (2014a). catkin make. [http://wiki.ros.org/catkin/commands/catkin\\_make](http://wiki.ros.org/catkin/commands/catkin_make).
- [36] ROS (2014b). qt-build. [http://wiki.ros.org/qt\\_ros](http://wiki.ros.org/qt_ros).
- [37] RullyFoote (2019). Topics. <http://wiki.ros.org/topics>.
- [38] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., and Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT.
- [39] Store, H. (2017). Rosbot 2.0. <https://store.husarion.com/collections/dev-kits/products/rosbot?variant=8799150276662>.
- [40] Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D. (2010). *Probabilistic robotics*. MIT Press.
- [41] Ulrich, I. and Borenstein, J. (1998). Vfh : reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, page 1572 to 1577.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/677362>.
- [42] Vidal, R., Shakernia, O., and Sastry, S. (2003). Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation. *ieeexplore*.
- [43] Xiaohai, L., Jizong, X., and Zijun, C. (2005). Backstepping based multiple mobile robots formation control. *ieeexplore*.



- [44] YoonSeok, P., HanCheol, C., RyuWoon, J., and TaeHoon, L. (2017). *ROS Robot Programming*. ROBOTIS Co,Ltd.



# Apéndices



---

## Apéndice 1. Nodos en ROS

---

### 3. Nodes

#### 3.1 amcl

amcl takes in a laser-based map, laser scans, and transform messages, and outputs pose estimates. On startup, amcl initializes its particle filter according to the parameters provided. Note that, because of the defaults, if no parameters are set, the initial filter state will be a moderately sized particle cloud centered about (0,0,0).

##### 3.1.1 Subscribed Topics

```
scan (sensor_msgs/LaserScan)
    Laser scans.

tf (tf/tfMessage)
    Transforms.

initialpose (geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped)
    Mean and covariance with which to (re-)initialize the particle filter.

map (nav_msgs/OccupancyGrid)
    When the use_map_topic parameter is set, AMCL subscribes to this topic to retrieve the map used for laser-based
    localization. New in navigation 1.4.2.
```

##### 3.1.2 Published Topics

```
amcl_pose (geometry_msgs/PoseWithCovarianceStamped)
    Robot's estimated pose in the map, with covariance.

particlecloud (geometry_msgs/PoseArray)
    The set of pose estimates being maintained by the filter.

tf (tf/tfMessage)
    Publishes the transform from odom (which can be remapped via the ~odom_frame_id parameter) to map.
```

##### 3.1.3 Services

```
global_localization (std_srvs/Empty)
    Initiate global localization, wherein all particles are dispersed randomly through the free space in the map.

request_nomotion_update (std_srvs/Empty)
    Service to manually perform update and publish updated particles.

set_map (nav_msgs/SetMap)
    Service to manually set a new map and pose.
```

Figura 1: Configuración de nodos en ROS parte A



### 3.1.5 Parameters

There are three categories of ROS [Parameters](#) that can be used to configure the `amcl` node: overall filter, laser model, and odometry model.

Overall filter parameters

- `~min_particles (int, default: 100)`  
Minimum allowed number of particles.
- `~max_particles (int, default: 5000)`  
Maximum allowed number of particles.
- `~kld_err (double, default: 0.01)`  
Maximum error between the true distribution and the estimated distribution.
- `~kld_z (double, default: 0.99)`  
Upper standard normal quantile for  $(1 - p)$ , where  $p$  is the probability that the error on the estimated distribution will be less than `kld_err`.
- `~update_min_d (double, default: 0.2 meters)`  
Translational movement required before performing a filter update.
- `~update_min_a (double, default:  $\pi/6.0$  radians)`  
Rotational movement required before performing a filter update.
- `~resample_interval (int, default: 2)`  
Number of filter updates required before resampling.
- `~transform_tolerance (double, default: 0.1 seconds)`  
Time with which to post-date the transform that is published, to indicate that this transform is valid into the future.
- `~recovery_alpha_slow (double, default: 0.0 (disabled))`  
Exponential decay rate for the slow average weight filter, used in deciding when to recover by adding random poses. A good value might be 0.001.
- `~recovery_alpha_fast (double, default: 0.0 (disabled))`  
Exponential decay rate for the fast average weight filter, used in deciding when to recover by adding random poses. A good value might be 0.1.
- `~initial_pose_x (double, default: 0.0 meters)`  
Initial pose mean (x), used to initialize filter with Gaussian distribution.
- `~initial_pose_y (double, default: 0.0 meters)`  
Initial pose mean (y), used to initialize filter with Gaussian distribution.

Figura 2: Configuración de nodos en ROS parte B

```

~initial_pose_a (double, default: 0.0 radians)
    Initial pose mean (yaw), used to initialize filter with Gaussian distribution.

~initial_cov_xx (double, default: 0.5*0.5 meters)
    Initial pose covariance (x*x), used to initialize filter with Gaussian distribution.

~initial_cov_yy (double, default: 0.5*0.5 meters)
    Initial pose covariance (y*y), used to initialize filter with Gaussian distribution.

~initial_cov_aa (double, default: (π/12)*(π/12) radian)
    Initial pose covariance (yaw*yaw), used to initialize filter with Gaussian distribution.

~gui_publish_rate (double, default: -1.0 Hz)
    Maximum rate (Hz) at which scans and paths are published for visualization, -1.0 to disable.

~save_pose_rate (double, default: 0.5 Hz)
    Maximum rate (Hz) at which to store the last estimated pose and covariance to the parameter server, in the variables
    ~initial_pose_* and ~initial_cov_*. This saved pose will be used on subsequent runs to initialize the filter. -1.0 to
    disable.

~use_map_topic (bool, default: false)
    When set to true, AMCL will subscribe to the map topic rather than making a service call to receive its map. New in
navigation 1.4.2

~first_map_only (bool, default: false)
    When set to true, AMCL will only use the first map it subscribes to, rather than updating each time a new one is
    received. New in navigation 1.4.2

Laser model parameters

Note that whichever mixture weights are in use should sum to 1. The beam model uses all 4: z_hit, z_short, z_max, and
z_rand. The likelihood_field model uses only 2: z_hit and z_rand.

~laser_min_range (double, default: -1.0)
    Minimum scan range to be considered; -1.0 will cause the laser's reported minimum range to be used.

~laser_max_range (double, default: -1.0)
    Maximum scan range to be considered; -1.0 will cause the laser's reported maximum range to be used.

~laser_max_beams (int, default: 30)
    How many evenly-spaced beams in each scan to be used when updating the filter.

~laser_z_hit (double, default: 0.95)
    Mixture weight for the z_hit part of the model.

~laser_z_short (double, default: 0.1)
    Mixture weight for the z_short part of the model.

```

Figura 3: Configuración de nodos en ROS parte C

## Apéndice 1. Nodos en ROS



```
~laser_z_max (double, default: 0.05)
    Mixture weight for the z_max part of the model.

~laser_z_rand (double, default: 0.05)
    Mixture weight for the z_rand part of the model.

~laser_sigma_hit (double, default: 0.2 meters)
    Standard deviation for Gaussian model used in z_hit part of the model.

~laser_lambda_short (double, default: 0.1)
    Exponential decay parameter for z_short part of model.

~laser_likelihood_max_dist (double, default: 2.0 meters)
    Maximum distance to do obstacle inflation on map, for use in likelihood_field model.

~laser_model_type (string, default: "likelihood_field")
    Which model to use, either beam, likelihood_field, or likelihood_field_prob (same as likelihood_field but incorporates the beamskip feature, if enabled).

Odometry model parameters

If ~odom_model_type is "diff" then we use the sample_motion_model_odometry algorithm from Probabilistic Robotics, p136; this model uses the noise parameters odom_alpha_1 through odom_alpha4, as defined in the book.

If ~odom_model_type is "omni" then we use a custom model for an omni-directional base, which uses odom_alpha_1 through odom_alpha_5. The meaning of the first four parameters is similar to that for the "diff" model. The fifth parameter capture the tendency of the robot to translate (without rotating) perpendicular to the observed direction of travel.

A bug was found and fixed. But fixing the old models would have changed or broken the localisation of already tuned robot systems, so the new fixed odometry models were added as new types "diff-corrected" and "omni-corrected". The default settings of the odom_alpha parameters only fit the old models, for the new model these values probably need to be a lot smaller, see http://answers.ros.org/question/227811/tuning-amcl-diff-corrected-and-omni-corrected-odom-models/.

~odom_model_type (string, default: "diff")
    Which model to use, either "diff", "omni", "diff-corrected" or "omni-corrected".

~odom_alpha1 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's rotation estimate from the rotational component of the robot's motion.

~odom_alpha2 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's rotation estimate from translational component of the robot's motion.

~odom_alpha3 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's translation estimate from the translational component of the robot's motion.

~odom_alpha4 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's translation estimate from the rotational component of the robot's motion.
```

Figura 4: Configuración de nodos en ROS parte D

```

~laser_model_type (string, default: "likelihood_field")
    Which model to use, either beam, likelihood_field, or likelihood_field_prob (same as likelihood_field but
    incorporates the beamskip feature, if enabled).

Odometry model parameters
If ~odom_model_type is "diff" then we use the sample_motion_model_odometry algorithm from Probabilistic Robotics,
p136; this model uses the noise parameters odom_alpha_1 through odom_alpha4, as defined in the book.

If ~odom_model_type is "omni" then we use a custom model for an omni-directional base, which uses odom_alpha_1
through odom_alpha_5. The meaning of the first four parameters is similar to that for the "diff" model. The fifth parameter
capture the tendency of the robot to translate (without rotating) perpendicular to the observed direction of travel.

A bug was found and fixed. But fixing the old models would have changed or broken the localisation of already tuned
robot systems, so the new fixed odometry models were added as new types "diff-corrected" and "omni-corrected".
The default settings of the odom_alpha parameters only fit the old models, for the new model these values probably need to
be a lot smaller, see http://answers.ros.org/question/227811/tuning-amcl-diff-corrected-and-omni-corrected-odom-models/.

~odom_model_type (string, default: "diff")
    Which model to use, either "diff", "omni", "diff-corrected" or "omni-corrected".

~odom_alpha1 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's rotation estimate from the rotational component of the robot's motion.

~odom_alpha2 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's rotation estimate from translational component of the robot's motion.

~odom_alpha3 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's translation estimate from the translational component of the robot's
    motion.

~odom_alpha4 (double, default: 0.2)
    Specifies the expected noise in odometry's translation estimate from the rotational component of the robot's motion.

~odom_alpha5 (double, default: 0.2)
    Translation-related noise parameter (only used if model is "omni").

~odom_frame_id (string, default: "odom")
    Which frame to use for odometry.

~base_frame_id (string, default: "base_link")
    Which frame to use for the robot base

~global_frame_id (string, default: "map")
    The name of the coordinate frame published by the localization system

~tf_broadcast (bool, default: true)
    Set this to false to prevent amcl from publishing the transform between the global frame and the odometry frame.

```

Figura 5: Configuración de nodos en ROS parte E



## **Anexos**



---

## Anexo 1. Programas Usados

---



Figura 6: Código QR para la consulta de los códigos empleados.



---

## Anexo 2. Criterios de selección en Áreas funcionales

---

	Resolución			Costo Computacional	Alcance de mediciones	Suma	Promedio
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>				
C <sub>1</sub>	1	4	2			7	<b>0.50000</b>
C <sub>2</sub>	0.25	1	0.25			1.5	<b>0.10714</b>
C <sub>3</sub>	0.5	4	1			5.5	<b>0.39286</b>
						14	1.00000
Resolución		Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
Rosbot	1	0.5		2	3.5	<b>0.28571</b>	
Tb3	2	1		4	7	<b>0.57143</b>	
Jet	0.5	0.25		1	1.75	<b>0.14286</b>	
					12.25	1.00000	
Costo Computacional		Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
Rosbot	1	0.5		0.25	1.75	<b>0.13208</b>	
Tb3	2	2		0.5	4.5	<b>0.33962</b>	
Jet	4	2		1	7	<b>0.52830</b>	
					13.25	1.00000	
Alcance de mediciones		Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
Rosbot	1	2		4	7	<b>0.53503</b>	
Tb3	0.5	1		3	4.5	<b>0.34395</b>	
Jet	0.25	0.33		1	1.58333	<b>0.12102</b>	
					13.08333	1	
Resultados		Resolución	Costo Computacional	Alcance de mediciones	Total		
Rosbot	0.28571	0.13208	0.53503	0.36720			
Tb3	0.57143	0.33962	0.34395	0.45723			
Jet	0.14286	0.52830	0.12102	0.17558			
Ponderación	<b>0.50000</b>	0.10714	0.39286				

Tabla 1: Tabla de selección para Percepción

Anexo 2. Criterios de selección en Áreas funcionales



	Velocidad			Compatibilidad		Documentación	
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Suma	Promedio		
<b>C<sub>1</sub></b>	1	0.5	2	3.5	<b>0.35000</b>		
<b>C<sub>2</sub></b>	2	1	1	4	<b>0.40000</b>		
<b>C<sub>3</sub></b>	0.5	1	1	2.5	<b>0.25000</b>		
				10	1.00000		
<b>Velocidad</b>							
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio		
<b>Rosbot</b>	1	2	0.125	3.125	<b>0.14368</b>		
<b>Tb3</b>	0.5	1	0.125	1.625	<b>0.07471</b>		
<b>Jet</b>	8	8	1	17	<b>0.78161</b>		
				21.75	1.00000		
<b>Compatibilidad</b>							
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio		
<b>Rosbot</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.25000</b>		
<b>Tb3</b>	2	1	2	5	<b>0.50000</b>		
<b>Jet</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.25000</b>		
				10	1.00000		
<b>Documentación</b>							
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio		
<b>Rosbot</b>	1	2	1	4	<b>0.40000</b>		
<b>Tb3</b>	0.5	1	2	3.5	<b>0.35000</b>		
<b>Jet</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.25000</b>		
				10	1.00000		
<b>Resultados</b>							
	Resolución	Costo Computacional	Alcance de mediciones	Total			
<b>Rosbot</b>	0.14368	0.25000	0.40000	0.25029			
<b>Tb3</b>	0.07471	0.50000	0.35000	0.31365			
<b>Jet</b>	0.78161	0.25000	0.25000	<b>0.43606</b>			
<b>Ponderación</b>	0.35000	<b>0.40000</b>	0.25000				

Tabla 2: Tabla de selección para Estructura

	Modular	Adaptable	Peso		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Suma	Promedio
C <sub>1</sub>	1	1	0.25	2.25	0.19149
C <sub>2</sub>	1	1	0.5	2.5	0.21277
C <sub>3</sub>	4	2	1	7	0.59574
				11.75	1.00000
<b>Modular</b>					
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio
	1	0.25	1	2.25	0.19149
Tb3	4	1	2	7	0.59574
Jet	1	0.5	1	2.5	0.21277
				11.75	1.00000
<b>Adaptable</b>					
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio
	1	0.5	2	3.5	0.28571
Tb3	2	1	4	7	0.57143
Jet	0.5	0.25	1	1.75	0.14286
				12.25	1.00000
<b>Peso</b>					
	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio
	1	0.5	2	3.5	0.28571
Tb3	2	1	4	7	0.57143
Jet	0.5	0.25	1	1.75	0.14286
				12.25	1.00000
<b>Resultados</b>					
	Resolución	Costo Computacional	Alcance de mediciones	Total	
	0.19149	0.28571	0.28571	0.26767	
Rosbot	0.19149	0.28571	0.28571	0.26767	
Tb3	0.59574	0.57143	0.57143	0.57608	
Jet	0.21277	0.14286	0.14286	0.15624	
Ponderación	0.19149	0.21277	0.59574		

Tabla 3: Tabla de selección para Procesamiento

Anexo 2. Criterios de selección en Áreas funcionales



	Corriente Máxima	Modos de Operación		Par		
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Suma	Promedio	
<b>C<sub>1</sub></b>	1	0.25	1	2.25	<b>0.20000</b>	
<b>C<sub>2</sub></b>	4	1	1	6	<b>0.53333</b>	
<b>C<sub>3</sub></b>	1	1	1	3	<b>0.26667</b>	
				11.25	1.00000	
<b>Corriente Máxima</b>						
Rosbot	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
<b>Rosbot</b>	1	0.25	1	2.25	<b>0.19149</b>	
<b>Tb3</b>	4	1	2	7	<b>0.59574</b>	
<b>Jet</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.21277</b>	
				11.75	1.00000	
<b>Modos de Operación</b>						
Rosbot	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
<b>Rosbot</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.25000</b>	
<b>Tb3</b>	2	1	2	5	<b>0.50000</b>	
<b>Jet</b>	1	0.5	1	2.5	<b>0.25000</b>	
				10	1.00000	
<b>Par</b>						
Rosbot	Rosbot	Tb3	Jet	Suma	Promedio	
<b>Rosbot</b>	1	2	4	7	<b>0.53503</b>	
<b>Tb3</b>	0.5	1	3	4.5	<b>0.34395</b>	
<b>Jet</b>	0.25	0.33	1	1.58333	<b>0.12102</b>	
				13.08333	1	
<b>Resultados</b>						
	Resolución	Costo Computacional	Alcance de mediciones	Total		
<b>Rosbot</b>	0.19149	0.25000	0.50000	<b>0.30496</b>		
<b>Tb3</b>	0.59574	0.50000	0.25000	<b>0.45248</b>		
<b>Jet</b>	0.21277	0.25000	0.25000	<b>0.24255</b>		
<b>Ponderación</b>	0.20000	<b>0.53333</b>	0.26667			

Tabla 4: Tabla de selección para Motores