



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN
AUTÓNOMO BASADO EN SLAM Y NAVEGACIÓN REACTIVA**

AUTORES: QUINALUISA MARTÍNEZ, EDISÓN FABRICIO

TOAPANTA CAMPOVERDE, JAIME ANDRÉS

DIRECTOR: MSc: LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2018



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "*IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO BASADO EN SLAM Y NAVEGACIÓN REACTIVA*" realizado por los señores *EDISON FABRICIO QUINALUISA MARTÍNEZ* y *JAIME ANDRÉS TOAPANTA CAMPOVERDE*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de mayo del 2018

Firma:



MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

DIRECTOR

CC:1708661549.....



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *EDISON FABRICIO QUINALUISA MARTÍNEZ* y *JAIME ANDRÉS TOAPANTA CAMPOVERDE*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO BASADO EN SLAM Y NAVEGACIÓN REACTIVA”*, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de mayo del 2018

Firman:

Quinaluisa Martínez

Edison Fabricio

CC. 1723295521

Toapanta Campoverde

Jaime Andrés

CC. 1722543376



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **EDISON FABRICIO QUINALUISA MARTÍNEZ** y **JAIME ANDRÉS TOAPANTA CAMPOVERDE**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE el trabajo de titulación "**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO BASADO EN SLAM Y NAVEGACIÓN REACTIVA**", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de mayo del 2018

Firman:

Quinaluisa Martínez

Edison Fabricio

CC. 1723295521

Toapanta Campoverde

Jaime Andrés

CC. 1722543376

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Jaime y Janeth, quienes siempre me apoyaron en momentos de éxito y de dificultad a lo largo de toda mi vida.

A mis amigos, por todas las experiencias que hemos compartido y por todo el apoyo brindado que ha hecho estos 6 últimos años muy gratificantes.

Andrés Toapanta

Dedico este exhaustivo trabajo a mis padres Ángel y Marlene, quienes me enseñaron a luchar siempre por lo que quiero.

A mis hermanos y hermanas que han sido parte fundamental en cada paso que doy en mi vida.

A mis amigos quienes me han apoyado y con los cuales he compartido grandes experiencias y enseñanzas que me han permitido crecer como persona.

Fabricio Quinaluisa

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios, porque ha sabido guiarnos por el camino correcto, dándonos sabiduría y conocimiento a lo largo de esta etapa de nuestras vidas fortaleciéndonos en cada paso para servir correctamente a la sociedad.

A nuestros padres y familias que son un pilar importante para la culminación de esta etapa ya que ellos quienes con paciencia y cariño siempre han estado ahí brindándonos su apoyo incondicional.

También, agradezco al grupo de docentes del Laboratorio de Procesos de Manufactura por aportar su experiencia, conocimientos y apoyo. Una mención especial para mi director de proyecto de titulación y a la vez director de nuestra carrera MSc. David Loza quien supo guiarnos para la culminación de nuestro objetivo permitiendo nuestro crecimiento profesional.

Por ultimo agradecer a mis amigos por siempre apoyarnos en todos nuestros objetivos planteados, y que con sus conocimientos, sabidurías y experiencias nos guiaron para culminar esta etapa de nuestras vidas.

Andrés y Fabricio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
Capítulo 1	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5

1.5.	Alcance.....	6
1.6.	Estructura del documento.....	8
Capítulo 2		9
2.1.	Robótica Móvil.....	9
2.2.	Navegación.....	11
2.2.1.	Cinemática de un Robot móvil.....	12
2.2.2.	Odometría.....	13
2.2.3.	Localización	15
2.2.4.	Percepción de un Robot móvil	16
2.3.	Dispositivos de percepción de un robot móvil.....	17
2.3.1.	Sonar.....	17
2.3.2.	LIDAR.....	19
2.3.3.	Kinect	21
2.4.	Localización de un robot móvil.....	22
2.4.1.	Localización Global	22
2.4.2.	Localización Local	22
2.5.	Métodos probabilísticos de corrección de localización.....	23
2.5.1.	Filtro de Kalman.....	23
2.5.2.	Filtro de Kalman Extendido	27

2.5.3. Filtro de partículas.....	28
2.6. Mapeo y Localización Simultáneo.....	32
2.6.1. Tipos de SLAM.....	32
2.6.2. SLAM en ROS.....	34
2.7. Navegación reactiva.....	34
2.8. Planificador de Trayectoria.....	36
2.8.1. Planificación basada en grafos de visibilidad.....	37
2.8.2. Planificación basada en diagramas de Voronoi.....	38
2.8.3. Planificación basada en modelado del espacio libre.....	39
2.8.4. Planificación basada en la descomposición en celdas.....	40
2.8.5. Rapidly Exploring Random Tree.....	41
2.9. Estación de carga.....	42
2.10. Resumen.....	44
Capítulo 3.....	46
3.1. Definición de Necesidades.....	46
3.2. Definición de especificaciones.....	48
3.3. Definición de subsistemas.....	49
3.3.1. Subsistema 1: Estructura y soporte.....	50
3.3.2. Subsistema 2: Locomoción.....	51

3.3.3. Subsistema 3: Localización y mapeo	51
3.3.4. Subsistema 4: Navegación Reactiva	51
3.3.5. Subsistema 5: Generación de trayectoria	51
3.3.6. Subsistema 6: Estación de carga	52
3.4. Evaluación y selección de alternativas.....	52
3.4.1. Subsistema 1: Estructura y soporte	52
3.4.2. Subsistema 2: Locomoción	55
3.4.3. Subsistema 3: Localización y mapeo	59
3.4.4. Subsistema 4: Navegación reactiva.....	65
3.4.5. Subsistema 5: Planificación de trayectoria.....	69
3.4.6. Subsistema 6: Estación de Carga y energía.....	69
3.5. Concepto final	72
3.6. Módulo de Estructura	76
3.6.1. Diseño Mecánico.....	76
3.6.2. Diseño Electrónico	87
3.6.3. Diseño Final	94
3.7. Módulo de Sensores	96
3.7.1. Diseño Mecánico.....	96
3.7.2. Diseño Electrónico	103

3.7.3. Diseño Final	106
3.8. Moduló de Estación de Carga	108
3.8.1. Diseño Mecánico.....	108
3.8.2. Diseño Electrónico	116
3.8.3. Diseño Final	120
3.9. Aditamento de Carga.....	121
3.9.1. Diseño Mecánico.....	121
3.9.2. Diseño Final	125
3.10. Diseño Final	126
3.11. Resumen.....	128
Capítulo 4	129
4.1. Estructura	129
4.1.1. Corte en agua de la estructura	129
4.1.2. Soldadura de la estructura	129
4.1.3. Maquinado de acoples de motores y pines de carga	130
4.1.4. Impresión 3D de bumpers	131
4.1.5. Pintura de la estructura.....	132
4.1.6. Ensamblaje de motores y rueda loca.....	132
4.1.7. Sujeción de otros elementos.....	133

4.1.8. Tarjeta electrónica	135
4.2. Módulo de sensores	136
4.2.1. Corte láser de bases	136
4.2.2. Impresión 3D de soportes.....	136
4.2.3. Malla contorno	137
4.2.4. Ensamble de sensores.....	137
4.2.5. Tarjeta electrónica	137
4.2.6. Sensor LIDAR.....	138
4.3. Estación de carga.....	139
4.3.1. Estructura	139
4.3.2. Placa electrónica.....	140
4.3.3. Placas de conexión	141
4.4. Control – Interfaz Humano Máquina	142
4.5. Implementación de SLAM	144
4.6. Implementación Navegación.....	146
4.6.1. Planificación de trayectoria.....	146
4.6.2. Navegación.....	148
4.7. Pruebas y resultados.....	149
4.7.1. Prueba de movilidad y odometría.....	149

4.7.2. Pruebas de SLAM	154
4.7.3. Prueba de posicionamiento en estación de carga	161
4.7.4. Prueba de planificador de trayectorias	166
4.7.5. Prueba de navegación reactiva	167
4.8. Resumen	169
Capítulo 5	171
5.1. Conclusiones	171
5.2. Recomendaciones y trabajos futuros	173
Bibliografía.....	175
Anexos.....	181
ANEXO A MANUAL DE USUARIO	182
ANEXO B PLANOS MECÁNICOS	183
ANEXO C PLANOS ELÉCTRICOS	184
ANEXO D DIAGRAMA DE FLUJO POSICIONAMIENTO ESTACIÓN DE CARGA.....	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Robot SIMBA, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.....	3
Figura 2. Estado inicial del Robot SIMBA	7
Figura 3. Robot móvil Summit XL de Robotnik.....	10
Figura 4. Robot móvil KUKA omniMove.	11
Figura 5. Tipos de desplazamiento.....	12
Figura 6. Plano global y plano referencial del robot.....	13
Figura 7. Odometría de un robot de desplazamiento diferencial.	14
Figura 8. Robot Móvil KUKA KMP 1500.....	17
Figura 9. Anillo de Sonares y Modo Reflexión del anillo de sonares.....	18
Figura 10. Cobertura de un anillo de sonares.....	19
Figura 11. Aplicación de LIDAR en robots aéreos, Mapeo.....	20
Figura 12. Mapeo con un sensor LIDAR.	20
Figura 13. Sensor Kinect.....	21
Figura 14. Esquema general del Filtro de Kalman.....	24
Figura 15. Circuito del filtro Kalman.....	26
Figura 16. Algoritmo del filtro Kalman.	26
Figura 17. Algoritmo del filtro de kalman Extendido.....	28
Figura 18. Esquema de etapas del filtro de partículas.....	30
Figura 19. Trayectorias simuladas por el algoritmo DWA para navegación.....	36
Figura 20. Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos	38
Figura 21. Retracción del espacio libre en un diagrama de Voronoi.....	39
Figura 22. Construcción de un CRG.....	39
Figura 23. Descomposición en celdas y grafo de conectividad.	40
Figura 24. Grafo de conectividad de una descomposición trapezoidal.....	41
Figura 25. Ejemplo de construcción de espacio de configuraciones RRT, con postprocesado. ...	41
Figura 26. Robot aspirador Chuwi Ilife v7s.....	42
Figura 27. Desglose de funciones del robot móvil.....	49

Figura 28. Subsistemas de la plataforma robótica móvil.	50
Figura 29. Alternativas de diseño de la plataforma robótica móvil para interiores.	54
Figura 30. Sistema diferencial de una rueda loca y dos ruedas motrices.....	57
Figura 31. Sistema diferencial de dos ruedas locas.....	57
Figura 32. Sistema diferencial de cuatro llantas motrices.....	58
Figura 33. Campo de visión frontal horizontal del sensor Kinect.....	61
Figura 34. Anillo de sonares en primer diseño de la plataforma robótica móvil.	62
Figura 35. Distancia de detección del laser del sensor lidar lineal.	62
Figura 36. Radio de alcance del lidar Omnidireccional 360°.	63
Figura 37. Cámara Monocular.	67
Figura 38. Base circular de la plataforma móvil para interiores	77
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre de rueda en un plano.	78
Figura 40. Análisis CAE con cargas estáticas en placa base de robot móvil.....	80
Figura 41. Deflexión en la placa base de la estructura del robot móvil.....	81
Figura 42. Contorno de la plataforma robótica móvil.....	82
Figura 43. Disposición de los elementos del Robot.....	82
Figura 44. Bumpers del robot.....	83
Figura 45. Sistema de tracción del robot.....	84
Figura 46. Rueda loca del sistema diferencial del robot.	84
Figura 47. Pines de Carga de la plataforma robótica móvil.....	85
Figura 48. Pines de Carga en la placa base del robot.....	86
Figura 49. Soporte de sensores infrarrojos.....	86
Figura 50. Ubicación del sensor giroscopio.....	88
Figura 51. Distribución Fines de Carrera.	89
Figura 52. Receptor infrarrojo encapsulado AX-1838HS.....	90
Figura 53. Posicionamiento de los sensores Sharp.	90
Figura 54. Funcionamiento de los sensores Sharp.	91
Figura 55. Controlador de motor a pasos.	91
Figura 56. Esquema de la placa electrónica de la plataforma robótica móvil.....	94
Figura 57. Modelo CAD y componentes del módulo de estructura.....	95

Figura 58. Módulo de estructura.	96
Figura 59. Forma y distribución de la placa base del módulo de sensores.	97
Figura 60. Soporte del Módulo de Sensores.	98
Figura 61. Análisis CAE con cargas estáticas en placa soporte de sensores.	99
Figura 62. Deflexión en la placa base de módulo sensores del robot móvil.	100
Figura 63. Simulación CAE de elemento de soporte de postes.	101
Figura 64. Deflexión del elemento mecánico de soporte de postes.	102
Figura 65. Tapa del módulo de sensores.	103
Figura 66. Distribución de Sensores ultrasónicos.	104
Figura 67. Posicionamiento del sensor lidar.	105
Figura 68. Esquema de la placa de adquisición y envío de datos del módulo de Sensores.	106
Figura 69. Moduló de sensores – Distribución	107
Figura 70. Módulo de sensores diseño Final.	107
Figura 71. Ángulo de apoyo de los pines de carga.	109
Figura 72. Sistema de Pedal para acople de la plataforma móvil y estación de carga.	110
Figura 73. Sistema de acople del robot y la estación de carga	111
Figura 74. Pedal de Acople de Estación de Carga.	112
Figura 75. Diseño CAD de Soportes de placa de carga.	112
Figura 76. Diseño CAD de las Placas de la estación de carga.	113
Figura 77. Diseño CAD de la estructura de la estación de carga.	114
Figura 78. Componentes de soporte de emisores infrarrojos.	115
Figura 79. Señal Modulada de emisores infrarrojos.	117
Figura 80. Señal superpuesta recibida en los receptores infrarrojos.	117
Figura 81. Zona de emisión de los emisores infrarrojos.	118
Figura 82. Circuito Rectificador de onda completa.	119
Figura 83. Placa Electrónica de estación de carga.	120
Figura 84. Diseño CAD de módulo de estación de Carga.	121
Figura 85. Representación de la Columna.	123
Figura 86. Base del aditamento de carga.	124
Figura 87. Contorno del compartimento del aditamento de carga.	125

Figura 88. Diseño fial del aditamento de carga.....	126
Figura 89. Modelo CAD de la plataforma robótica móvil.....	127
Figura 90. Proceso de barolado de contornos de la estructura.....	130
Figura 91. Estructura soldada por técnica de puntos en el contorno.....	130
Figura 92. Bumper delantero y bumper trasero	131
Figura 93. Acabados en estructura de robot móvil.....	132
Figura 94. Ensamble de motores y acople, Ensamble de rueda loca.....	133
Figura 95. Broche de presión retráctil.....	133
Figura 96. Montaje de placa electrónica, baterías y drivers.....	134
Figura 97. Montaje de pines de carga en el robot móvil y sensor Sharp.....	135
Figura 98. Placa electrónica de expansión de puertos GPIO.....	135
Figura 99. Montaje de sensores ultrasónicos en la base del módulo.....	137
Figura 100. Construcción placa electrónica.....	138
Figura 101. RPLidar A1	139
Figura 102. Módulo de sensores ensamblado.....	139
Figura 103. Estructura ensamblada de la estación de carga.....	140
Figura 104. Placa electrónica de la estación de carga.....	141
Figura 105. Placas de conexión de carga.....	141
Figura 106. Diferencia entre la pltaforma móvil previa y la propuesta.....	142
Figura 107. Interfaz Humano-Máquina de la plataforma robótica móvil SIMBA.....	143
Figura 108. Panel principal de control.....	143
Figura 109. Funcionamiento y visualización de la interfaz.....	144
Figura 110. Método de SLAM -Gmapping.....	145
Figura 111. Algoritmo de funcionamiento del método Gmapping.....	145
Figura 112. Representación de trayectorias simuladas en DWA local planner.....	148
Figura 113. Trayectorias cuadrada - prueba de odometría.....	150
Figura 114. Seguimiento de trayectoria Cuadrada.....	151
Figura 115. Trayectoria circular - prueba de odometría.....	152
Figura 116. Seguimiento de Trayectoria Circular.....	153
Figura 117. Entorno de prueba de mapeo - Local.....	155

Figura 118. Entorno de prueba de mapeo - Departamento.	156
Figura 119. Mapeo m1 de entorno 2 -Local.....	157
Figura 120. Mapeo m2 de entorno 2 -Local.....	157
Figura 121. Mapeo m3 de entorno 2 -Local.....	158
Figura 122. Mapeo m4 de entorno 2 -Local.....	158
Figura 123. Mapeo mc1 de entorno 2 -Departamento.	159
Figura 124. Mapeo mc2 de entorno 2 – Departamento.....	159
Figura 125. Mapeo mc3 de entorno 2 – Departamento.....	159
Figura 126. Mapeo mc4 de entorno 2 - Departamento.	159
Figura 127. Principales medidas del entorno 1.	160
Figura 128. Principales medidas del entorno 2.	160
Figura 129. Onda modulada del primer emisor infrarrojo derecho.	163
Figura 130. Onda modulada del segundo emisor infrarrojo central.....	163
Figura 131. Onda modulada del tercer emisor infrarrojo izquierdo.....	163
Figura 132. Periodo del pulso de la onda modulada.	164
Figura 133. Posición inicial de la plataforma robótica móvil.	165
Figura 134. Posición final de la plataforma robótica móvil.....	166
Figura 135. Planeador global en ruta. a) Plan inicial b) Plan posterior.	166
Figura 136. Trayectoria del robot móvil en navegación.	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Necesidades de la plataforma robótica móvil para interiores.....</i>	47
Tabla 2 <i>Especificaciones para necesidades con su respectiva metrica.</i>	48
Tabla 3 <i>Subsistemas del problema planteado.</i>	50
Tabla 4 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 1.....</i>	53
Tabla 5 <i>Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 1.</i>	54
Tabla 6 <i>Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño del subsistema 1.</i>	54
Tabla 7 <i>Ponderación de movilidad para las alternativas de diseño del subsistema 1.</i>	54
Tabla 8 <i>Ponderación de Estructura y soporte con las alternativas de diseño al subsistema 1.</i>	55
Tabla 9 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 2.....</i>	56
Tabla 10 <i>Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 2.</i>	58
Tabla 11 <i>Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño del subsistema 2.</i>	58
Tabla 12 <i>Ponderación de movilidad para las alternativas de diseño del subsistema 2.</i>	58
Tabla 13 <i>Ponderación de tracción para las alternativas de diseño del subsistema 2.</i>	59
Tabla 14 <i>Ponderación de locomoción con las alternativas de diseño al subsistema 2.</i>	59
Tabla 15 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 3.....</i>	60
Tabla 16 <i>Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 3.</i>	64
Tabla 17 <i>Ponderación de coste computacional para las alternativas del subsistema 3.....</i>	64
Tabla 18 <i>Ponderación de ángulo de visión para las alternativas de diseño del subsistema 3.</i>	64
Tabla 19 <i>Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 3.</i>	64
Tabla 20 <i>Ponderación de localización y mapeo con las alternativas del subsistema 3.</i>	65
Tabla 21 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 4.....</i>	66

Tabla 22	<i>Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 4.</i>	67
Tabla 23	<i>Ponderación de coste computacional para las alternativas del subsistema 4.</i>	68
Tabla 24	<i>Ponderación de ángulo de visión para las alternativas de diseño del subsistema 4.</i>	68
Tabla 25	<i>Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 4.</i>	68
Tabla 26	<i>Ponderación para navegación reactiva con las alternativas del subsistema 4.</i>	69
Tabla 27	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 6.</i>	70
Tabla 28	<i>Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 6.</i>	71
Tabla 29	<i>Ponderación de precisión para las alternativas de diseño del subsistema 6.</i>	71
Tabla 30	<i>Ponderación de confiabilidad para las alternativas de diseño del subsistema 6.</i>	71
Tabla 31	<i>Ponderación de estación de carga con las alternativas de diseño del subsistema 6.</i>	72
Tabla 32	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el computador.</i>	73
Tabla 33	<i>Ponderación de tamaño para las alternativas del computador de la plataforma.</i>	74
Tabla 34	<i>Ponderación de conectividad de alternativas del computador de la plataforma.</i>	74
Tabla 35	<i>Ponderación de procesamiento de alternativas del computador de la plataforma.</i>	74
Tabla 36	<i>Ponderación de costo para las alternativas del computador de la plataforma.</i>	75
Tabla 37	<i>Ponderación de alternativas para la selección de computador de la plataforma.</i>	75
Tabla 38	<i>Módulos de la Plataforma Robótica móvil para interiores.</i>	77
Tabla 39	<i>Consideraciones de cargas para el análisis en la placa base del robot.</i>	78
Tabla 40	<i>Propiedades del Material de la placa Base.</i>	80
Tabla 41	<i>Elementos del Sistema de Tracción de la plataforma móvil.</i>	84
Tabla 42	<i>Características independientes de cada batería.</i>	87
Tabla 43	<i>Características energéticas de la plataforma robótica móvil.</i>	87
Tabla 44	<i>Características del controlador de motor a pasos.</i>	92

Tabla 45 <i>Características del minicomputador Raspberry Pi 2</i>	93
Tabla 46 <i>Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil.</i>	95
Tabla 47 <i>Consideraciones para el análisis en la placa base del módulo de sensores</i>	98
Tabla 48 <i>Propiedades del Material de la placa Base.</i>	99
Tabla 49 <i>Características Malla del módulo de sensores</i>	102
Tabla 50 <i>Componentes del Módulo de Sensores de la plataforma robótica móvil</i>	108
Tabla 51 <i>Soporte de emisores infrarrojos.</i>	115
Tabla 52 <i>Características del Material para los ejes.</i>	122
Tabla 53 <i>Componentes del aditamento de carga de la plataforma robótica móvil.</i>	126
Tabla 54 <i>Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil.</i>	127
Tabla 55 <i>Resultados de odometría en trayectoria cuadrada.</i>	151
Tabla 56 <i>Resultados de odometría en trayectoria circular.</i>	153
Tabla 57 <i>Prueba energética de la plataforma en movimiento lineal.</i>	154
Tabla 58 <i>Prueba energética de la plataforma en movimiento angular.</i>	154
Tabla 59 <i>Resultados mapeo entorno 1 – Local</i>	156
Tabla 60 <i>Resultados mapeo entorno 2 - Departamento.</i>	156
Tabla 61 <i>Resultados comparación de medidas entorno 1</i>	161
Tabla 62 <i>Resultados comparación de medidas entorno 2</i>	161
Tabla 63 <i>Resultados de posicionamiento de la estación de carga.</i>	165
Tabla 64 <i>Resultados de navegación de localización</i>	168
Tabla 65 <i>Resultados de navegación de localización real respecto a la meta establecida.</i>	169

RESUMEN

La robótica móvil se ha desarrollado en la actualidad para facilitar a los seres humanos en diferentes actividades, lo que ha despertado interés en temas de investigación para obtener robots completamente autónomos. La autonomía de un robot móvil de interiores consta de la localización y navegación en un entorno, la evasión de obstáculos y su autonomía energética. Un problema común de los robots móviles es el conocimiento de un entorno, la aplicación de SLAM (Localización y Mapeo Simultáneo) permite obtener un mapa con la ubicación de paredes, puertas, muebles, etc. Dentro del mismo problema tenemos la navegación que nos permite posicionar al robot en una meta trazando una trayectoria y evadiendo obstáculos. Se complementa la autonomía con la sustentación energética a través de una estación de carga para el robot. El presente trabajo se enfoca a implementar soluciones de autonomía para un robot móvil, dando solución a los problemas de SLAM, Navegación y sustentación energética. El documento está organizado en 5 capítulos los cuales se presentan de la siguiente manera: Capítulo 1 se da una introducción del proyecto, Capítulo 2 se muestra el estado del Arte acerca del contenido de nuestro proyecto, Capítulo 3 se realiza el diseño completo para la nueva plataforma robótica móvil y su estación de carga. El capítulo 4 muestra el desarrollo de la construcción del robot, la estación de carga, pruebas y resultados terminando con el capítulo 5 donde se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras Clave

- **ROBOT MÓVIL**
- **LOCALIZACIÓN Y MAPEO SIMULTANEO (SLAM)**
- **NAVEGACIÓN**
- **ESTACIÓN DE CARGA**

ABSTRACT

Mobile robotics has been developed to facilitate human beings in different activities, which has aroused interest in research to obtain fully autonomous robots. The autonomy of a mobile robot consists of the localization and navigation in an environment, the evasion of obstacles and its energetic autonomy. A common problem of mobile robots is the auto knowledge of an environment, the SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) allows the robot to obtain a map where are located walls, doors, furniture. Within the same problem we have the navigation that allows move through a pre calculated path avoiding obstacles. It complements the autonomy with the energetic sustentation through a charging station for the robot. The present work focuses on implementing autonomy solutions for a mobile robot, giving solution to the problems of SLAM, autonomous navigation and energy sustentation. The document is organized into 5 chapters which are presented as follows: Chapter 1 gives an introduction to the project, Chapter 2 shows the state of the Art about the content of our project, Chapter 3 the complete design for the new one is made mobile robotic platform and its charging station. Chapter 4 shows the development of the construction of the robot, the charging station, tests and results ending with chapter 5 where the conclusions and recommendations are presented.

Keywords

- **UNMANNED GROUND VEHICLE**
- **SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING**
- **AUTONOMOUS NAVIGATION**
- **DOCKING STATION**

Capítulo 1

Introducción

El primer capítulo nos presenta la necesidad de construcción de un robot móvil autónomo para interiores y se justifica su desarrollo e importancia. Dentro del contexto se hace una breve revisión a los trabajos previos acerca de los robots móviles a fin de encontrar mejoras. Se plantean el problema, los objetivos, alcance del proyecto que se pretende cubrir y se describe la estructura del documento.

1.1. Planteamiento del problema

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se ha encontrado que los prototipos desarrollados en el campo de la robótica móvil carecen de un sistema autónomo, es decir, no poseen un sistema de localización y navegación dentro de un entorno real y carecen de un sistema propio de alimentación energética. Se hace un enfoque especial a la plataforma robótica móvil SIMBA para interiores en la cual se trabajará en la resolución de un sistema autónomo para el robot.

En los últimos años en el Ecuador se ha venido desarrollando diferentes proyectos en el campo de la robótica móvil. En la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE se han desarrollados varios prototipos tales como es el caso del desarrollo de la plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015). Otro prototipo realizado en el campo de la robótica móvil el cual posee ya un aspecto para la autonomía es la plataforma robótica para exteriores con su sistema de ubicación (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016).

Dichos prototipos se han ido mejorando en la misma universidad con resultados dentro de las aplicaciones para los cuales se han diseñado y construido. Gracias al aporte de la robótica móvil se ha visto necesario complementar con el desarrollo de los prototipos existentes en cuestión de su autonomía.

Dentro del problema planteado se implementará un sistema autónomo el cual consta de la implementación de un sistema de SLAM y navegación reactiva para el libre movimiento y conocimiento del entorno. La implementación de sistema de carga automático de baterías del robot móvil como complemento del sistema autónomo del robot.

1.2. Antecedentes

El trabajo se realizará tomando como base el robot móvil SIMBA de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015).

La plataforma móvil, nombrada por sus desarrolladores como “SIMBA”, es un robot con forma de octágono, con dos ruedas motrices y dos ruedas tipo “castor” en configuración diferencial. Las ruedas motrices son impulsadas por motores a pasos controlados en lazo abierto con buenos resultados en el desplazamiento y odometría.

El robot Simba, en su sistema sensorial posee principalmente una cámara KINECT, la cual es empleada para la visión artificial del robot, dotándole de la capacidad de realizar SLAM. El robot posee un anillo de ocho sensores de tipo ultrasonido ubicados en cada lado del octágono del cuerpo del robot, lo que le permite establecer la navegación reactiva en base a la percepción de los sensores. En su sistema electrónico, el robot Simba posee tres microcontroladores Arduino, que

sirven de interfaz de los sensores/actuadores y la computadora principal de a bordo, como lo muestra la Figura 1.



Figura 1. Robot SIMBA, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
Fuente: (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015)

En la programación de algoritmos y sistemas de control, la plataforma móvil ha sido implementada bajo el software libre ROS, posee nodos de control en Python y C++. La plataforma robótica móvil para interiores en su primer diseño presenta las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas

- Capacidad de realizar SLAM mediante un sensor Kinect de bajo costo.
- Uso de anillo de sensores ultrasónicos para detección de obstáculos.
- Resolución cinemática sencilla del sistema diferencial de locomoción.
- Control de movilidad inalámbrica con Joystick.

Desventajas

- Dependencia energética de un cargador de baterías.
- Dependencia de la cámara Kinect a un tomacorriente 120V.
- Dependencia total de un computador portátil a bordo con 4 puertos USB.

- Exceso de microcontroladores.
- Tamaño excesivo.
- Realización de SLAM en ambientes controlados.

1.3. Justificación e importancia

Uno de los principales problemas de la robótica actual es la autonomía en el robot, en la planificación y ejecución de tareas de movimiento sin guía humana para operar en ambientes hostiles y en el campo de la robótica de servicios, que incluye: gestión de residuos, limpieza, transporte de objetos, asistencia a personas con discapacidad, entre otros (Oriolo, Ulivi, & Venditelli, 1998).

La autonomía para un robot móvil está dada por varios factores entre ellos se encuentra la localización del robot en un plano, el mapeo de entornos en el cual el robot se encuentra (Cox & Wilfong, 1990), el autoanálisis de cantidad de energía almacenada por las baterías del robot y carga de las mismas, entre lo más importante.

El fin de la investigación es aplicar ciertas soluciones analizadas en la teoría y por medio de las mismas evaluar su desempeño dentro del robot para solventar parte del problema de autonomía. Por ello se aplicará SLAM (Siegwart & Nourbakhsh, 2011) a la plataforma robótica móvil lo cual permitirá tener la capacidad de elaborar mapas de interiores de edificaciones (departamentos, salones, fábricas, etc) sin dejar de lado la localización del robot en el mismo plano elaborado.

Se implementará navegación reactiva dotando al robot con el plus del sistema sensorial, así con un algoritmo (Galindo & Ruiz- Sarmiento, 2010) que permita al robot ubicar obstáculos y evitarlos de manera que ninguna de sus partes choque con los mismos.

Por último, para solventar el problema de energía, se construirá una estación de carga, a la cual el robot llegará de manera autónoma al tener poca energía almacenada.

La importancia del presente trabajo se basa en la obtención y aplicación de conocimientos en el campo de la robótica móvil de servicio de transporte de objetos. El trabajo que se realizará en la plataforma robótica para interiores SIMBA es necesario e importante para el desarrollo de robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

En el presente trabajo nuestro objetivo general es **implementar un sistema de navegación autónomo basado en SLAM y navegación reactiva** para la plataforma robótica móvil para interiores de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

1.4.2. Objetivos Específicos

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

- Diseñar y construir la estación de carga de baterías para la plataforma de interiores.
- Reparación y rediseño de la plataforma robótica móvil para interiores SIMBA.
- Diseñar e implementar una placa electrónica de toma de datos y control de la plataforma de interiores.
- Implementar el control de la plataforma robótica móvil utilizando el sistema operativo robótico (ROS),
- Realizar localización y mapeo simultáneos.

- Implementar la movilidad de la plataforma con un mando inalámbrico de conducción y también con navegación reactiva autónoma.

1.5. Alcance

Dentro de lo mencionado en cuanto a prototipos realizados en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se tiene a la plataforma robótica móvil para interiores SIMBA (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015), en la cual se trabajará el presente proyecto. Se procede a la evaluación inicial de la plataforma robótica móvil para interiores, en la cual se puede observar lo siguiente:

- La plataforma de interiores, está compuesta por una estructura metálica de tol, con forma octogonal de 55 cm de diámetro circunscrito. Con una tapa de acrílico. La estructura está pintada de color azul y el acrílico posee un adhesivo de color negro. Posee un botón de paro de emergencia en la tapa superior.
- Los motores, encargados del movimiento, son motores a pasos NEMA 23, los cuales se encuentran internamente acoplados a la base del robot.
- Las ruedas, de 14cm de diámetro están acopladas a los motores directamente, sin reducciones de ningún tipo.
- Posee una cámara Kinect, de rango máximo 4m, y mínimo 80cm. Para realizar SLAM.
- Tiene 8 sensores ultrasónicos en anillo, en cada lado del octágono de la estructura, conectados por cables y sockets de conexión hacia un microcontrolador. También posee 4 fines de carrera, ubicados en lados opuestos.

- Microcontroladores Arduino MEGA, uno para interfaz de sensores y otro para actuadores, un microcontrolador Arduino Nano como señal de reloj para los motores a pasos.
- Dos baterías de 12 V, 7AH para energizar los motores.
- Un driver de control de motor a pasos, de 24V, 5A. con la capacidad de micro pulsos.
- La plataforma consta con su software completo para funcionamiento.

En la *Figura 2* se puede observar el estado inicial de la parte interna y externa del Robot SIMBA.

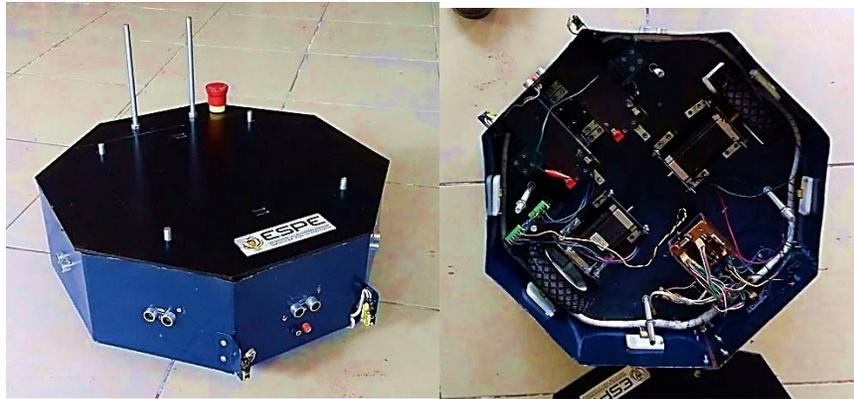


Figura 2. Estado inicial del Robot SIMBA: a) Externo b) Interno.

Luego de realizar un análisis inicial sobre la misma tanto en su funcionalidad como en su estructura física, se concluyó alcanzar lo siguiente:

Se realizará mejoras en el chasis de la plataforma para que se tenga una distribución adecuada optimizando el espacio interior en todos los elementos a interactuar en el funcionamiento.

Se diseñará y construirá una estación de carga de baterías para la sustentabilidad energética de la plataforma robótica móvil. La misma podrá ubicarse de manera automática en la estación de carga cuando la energía de las baterías esté por agotarse.

Se diseñará y construirá una tarjeta electrónica para la transmisión, recepción de datos y control de los sensores y actuadores que se encuentran en la plataforma robótica móvil.

La plataforma podrá realizar el mapeo de interiores, con movilidad controlada haciendo uso de un mando inalámbrico.

La plataforma podrá navegar de un punto inicial hacia una meta especificada sobre el mapa y evitando obstáculos.

1.6. Estructura del documento

El documento propone una estructura en cinco capítulos donde se mostrará y describirá toda la información y desarrollo del trabajo a realizar en la plataforma robótica móvil para interiores.

En el capítulo 1 nos presenta las generalidades y precedentes que se tiene atrás del proyecto a realizar, se definen los objetivos al igual que el alcance del mismo. En el capítulo 2 se muestra una visión general en cuanto al campo de la robótica móvil y conceptualización, mostrando además el estado del arte respecto a investigaciones de los sistemas involucrados en la autonomía del robot.

En el capítulo 3 presenta el desarrollo mecatrónico del trabajo. Se detallarán las especificaciones técnicas requeridas, las alternativas de selección y el concepto final a ser probado.

La construcción e implementación de la plataforma robótica móvil para interiores se lo realizará en el capítulo 4 y también se detalla las pruebas realizadas en la plataforma, así como, el refinamiento y resultados de la misma.

Finalmente, como capítulo 5, se detalla las conclusiones y recomendaciones obtenidas del trabajo realizado durante todo el proceso de desarrollo.

Capítulo 2

Estado del arte

El capítulo presenta conceptos sobre robótica móvil y sus aplicaciones. También se analiza sobre la cinemática de los robots móviles y métodos de localización y navegación. Se plantea el sistema de navegación reactiva, así como algunos algoritmos para la solución del problema planteado. Dentro de navegación y ubicación del robot se tiene el método de localización y mapeo simultáneo (SLAM) que se implementará dentro de la plataforma robótica para interiores.

2.1. Robótica Móvil

Dentro de la clasificación de la robótica se destaca a los robots móviles. Los robots móviles a partir de la teoría clásica se definen como: “Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento (re) programado por medio de control automático para realizar una tarea específica” (Lazea, 2001).

Con la definición de un robot móvil se añade que para que un robot sea considerado robot móvil debe contar con un sistema de locomoción que le permita desplazarse en el ambiente en el cual va a trabajar. En las características de un robot móvil es importante destacar la autonomía que el robot puede presentar para la ejecución de las funciones a realizar, dentro de ello se tiene como una función importante a la navegación. El robot tiene la capacidad de desplazarse dentro del entorno que se encuentra, sin la intervención de un operador humano, al igual que evadir obstáculos que se encuentren dentro de su trayectoria de desplazamiento.

Dentro de la robótica móvil en los últimos años y actualmente, los robots móviles se han convertido en herramientas muy necesarias en diferentes aplicaciones. Las aplicaciones de los robots se ajustan dependiendo el proceso o función en que deba desenvolverse. Los trabajos de los robots móviles pueden ser desde el movimiento de materia prima en una célula de manufactura o movimiento de cargas en una trayectoria de larga distancia. En otras aplicaciones se tiene dentro de diferentes campos como la agricultura, en el campo nuclear, seguridad y defensa, inspección y mantenimiento



Figura 3. Robot móvil Summit XL de Robotnik
Fuente: (Adamides, 2013)

En la *Figura 3* se puede observar a la plataforma robótica móvil Summir XL (Adamides, 2013) el cual desempeña su trabajo en el campo de la agricultura, su trabajo principal es fumigación.



Figura 4. Robot móvil KUKA omniMove.
Fuente: (KUKA, 2017)

En la figura 4 se puede observar al robot KUKA omniMove el cual está diseñado para trabajar en procesos de ensamblaje especializados para cargas pesadas. Es importante destacar el impacto de los robots móviles en la interacción con el ser humano para aplicaciones donde su seguridad está en riesgo, los robots móviles realizan el trabajo pesado por los operadores o, como en el ejemplo de omniMove, realiza el trabajo de manera autónoma.

2.2. Navegación

La navegación es una de más las importantes competencias requeridas de un robot móvil. Para lograr una navegación se debe tener éxito en los cuatro pilares fundamentales de la navegación. (Siegwart & Nourbakhsh, 2011) Los cuatro pilares importantes de la navegación son: La Odometría, el posicionamiento del robot o localización, percepción del entorno y el control sobre los actuadores.

2.2.1. Cinemática de un Robot móvil

Es necesaria la descripción y entendimiento de la cinemática del robot móvil, el análisis utiliza la geometría del robot sin considerar las fuerzas que intervienen en los movimientos.

El desplazamiento diferencial, es el que posee actualmente la plataforma de interiores, que consta de dos ruedas motrices y para mantener el equilibrio también posee ruedas pasivas.

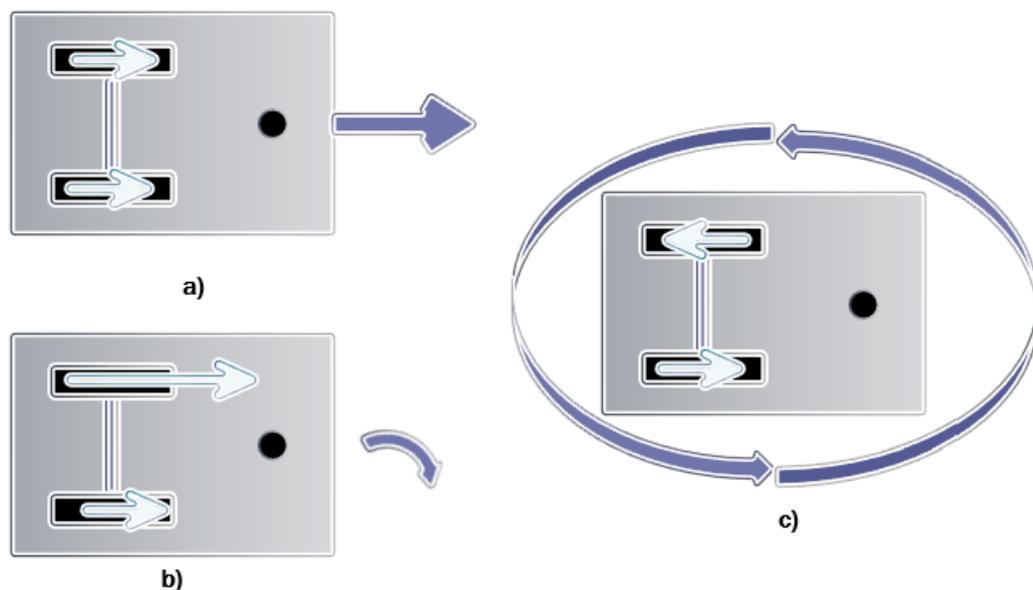


Figura 5. Tipos de desplazamiento diferencial. a) movimiento lineal, b) movimiento curvilíneo, c) movimiento rotatorio.

Como lo muestra la Figura 5 (Bräunl, 1998), la plataforma de interiores puede mantener una trayectoria en línea recta si las ruedas motrices rotan en el mismo sentido y velocidad, en cambio, si una rueda gira a menor velocidad que otra, se tiene como resultante una trayectoria curvilínea. Si se requiere realizar una rotación en el propio terreno las dos ruedas motrices deben tener la misma velocidad, pero en sentido contrario.

El robot en su movimiento se analiza respecto a un plano horizontal fijo y otro móvil. En el cual el plano horizontal fijo corresponde a un plano global del robot y se lo utiliza como referencia. Como lo muestra la *Figura 6*, el plano fijo se define por los ejes X_I, Y_I .

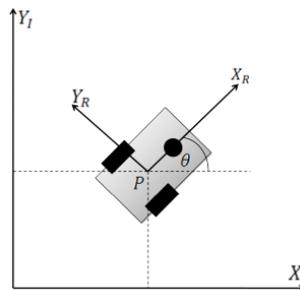


Figura 6. Plano global y plano referencial del robot.
Fuente: (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015)

El plano referencial del robot, se muestra también en la *Figura 6*, definido por los ejes X_R, Y_R . Los ejes permiten especificar matemáticamente la posición, velocidad y aceleración en el punto P, que corresponde al centro de giro de la configuración diferencial del robot. El punto P, se especifica en el plano global por las coordenadas x e y , y la orientación se expresa por el ángulo θ .

Las variables que intervienen directamente en la cinemática del robot son: velocidades angulares de cada rueda ω_1, ω_2 ; distancia entre las ruedas l , diámetro de las ruedas ϕ_r .

La estimación de la posición del robot es necesaria para la navegación, en base a la odometría se puede calcular el desplazamiento y su trayectoria.

2.2.2. Odometría

La odometría es un método utilizado para estimar la posición de un robot móvil, (Ortiz, 2014). Dicho método se puede basar en la medición de velocidad angular a través de encoders y haciendo uso de la acumulación de desplazamientos (integración del camino).

$$\begin{pmatrix} x(t + \Delta t) \\ y(t + \Delta t) \\ z(t + \Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (1)$$

La ecuación de la odometría para el robot de desplazamiento diferencial se expresa en la ecuación 1.

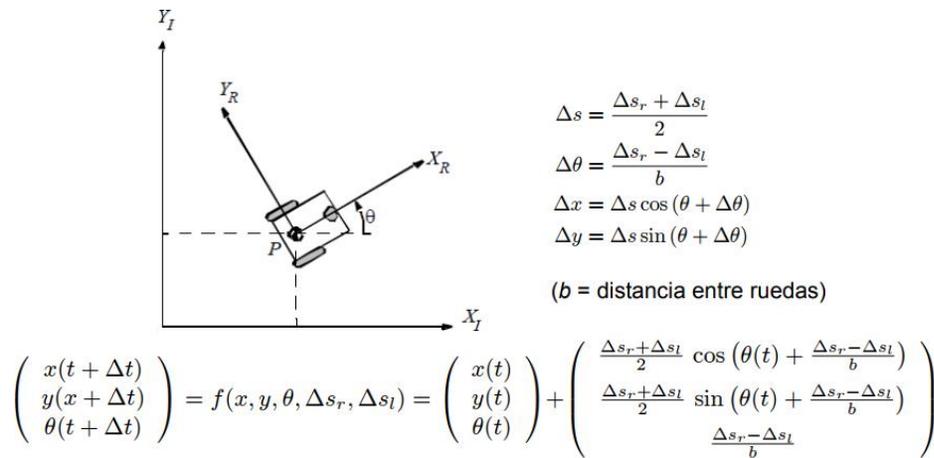


Figura 7. Odometría de un robot de desplazamiento diferencial.

Fuente: (Ortiz, 2014)

En las ecuaciones y gráfico de la *Figura 7*, se puede apreciar la posición del robot móvil diferencial para cualquier tiempo, conocido el desplazamiento angular de cada rueda en cada intervalo temporal.

Cabe mencionar que el método descrito está determinado por las mediciones que se realicen sobre las ruedas ocasionando errores los cuales son sistemáticos y no sistemáticos (Ortiz, 2014).

Los errores sistemáticos pueden deberse a desalineación de las ruedas, fallas mecánicas (backlash), incertidumbre en el diámetro de las ruedas (ruedas diferentes, ruedas deformadas). Los

errores no sistemáticos en la medición son: resolución limitada de sensores, ruedas patinando, suelo desigual, etc.

Dichos tipos de errores, se pueden minimizar, y otros son prácticamente imposible de medir y por ende anticiparse, por lo que se han implementado sistemas de localización probabilística, que, si bien se basan en la odometría propia del robot, realizan correcciones probabilísticas, entre ellos: Markov, Filtro Kalman, Filtro Kalman extendido (Mattamala Aravena, 2013), filtro de partículas (Gallardo López, 1999).

2.2.3. Localización

La localización es uno de los pilares para la navegación (Vallés Miquel & Valera Fernández, 2014), como requisito se debe disponer de información de la posición del robot en los siguientes aspectos (Ortiz, 2014):

- Relativa: respecto al inicio del movimiento
- Absoluta: respecto a un mapa

La localización absoluta es conocer la posición del robot respecto a un sistema de coordenadas (Gallardo López, 1999), esto se puede realizar a través de sistemas GPS. En entornos cerrados no es posible su utilización, debido a que en entornos cerrados se requiere de precisión más alta y funcionamiento en interiores.

Respecto a un mapa local se puede establecer la localización absoluta de un robot móvil, conociendo la posición del robot dentro del mapa creado mediante SLAM o un mapa digital arquitectónico.

La posición relativa, respecto al inicio del movimiento es posible realizar con la odometría del robot, pero no es suficiente para determinar la posición real debido a que mientras el robot móvil se desplaza aumenta el error.

2.2.4. Percepción de un Robot móvil

“La percepción como capacidad de los seres vivos, obedece a los estímulos cerebrales que son logrados a través de los sentidos (vista, olfato, tacto, oído y gusto), los cuales dan una realidad física del entorno en el que un individuo se desenvuelve” (Oxford, 2014)

En el ser humano uno de los procesos más significativos y característicos es la percepción de su entorno. Un robot móvil debe ser capaz de interactuar en el entorno en el que va a desenvolverse, por lo que el sentido de la percepción es muy importante para su autonomía.

El robot móvil para ser un sistema autónomo debe ser capaz de entender lo que sucede dentro de su entorno y ejecutar su trabajo. Un sistema de percepción al mismo nivel que un ser humano ha sido un reto de investigación desde el inicio de la robótica.

A lo largo del tiempo y la evolución de la tecnología ha permitido desarrollar sistemas que ayudan a los robots en su sistema de percepción, para con ellos interactuar con su entorno y recibir la mayor información del mismo.



Figura 8. Robot Móvil KUKA KMP 1500.
Fuente: (KUKA, 2017)

Un claro ejemplo de la percepción de un robot móvil es el robot KUKA KMP 1500 el cual se muestra en la *Figura 8*. El robot está equipado para reconocer los objetos presentes en el entorno y planificar trayectorias de movimiento sobre ambientes cambiantes de manera autónoma.

2.3. Dispositivos de percepción de un robot móvil

En las características de un robot móvil dentro de navegación el sistema sensorial es de gran importancia ya que cumplen la función de obtener información del entorno donde desarrolla su trabajo. Existen diferentes dispositivos que son los más utilizados para lograr la navegación o localización de un robot móvil.

2.3.1. Sonar

El Sonar es un sensor ultrasónico el cual mide distancia o detecta proximidad mediante la reflexión de ondas. El principio de navegación basado en sonares en un robot móvil es de poca confiabilidad cuando es usado como sensor principal, por el retorno de señales erróneas, además que por lo general se ve afectado por factores medioambientales.

Debido al alto grado de conocimiento del entorno que requiere un robot móvil y ante la poca confiabilidad que presentan el sensor sonar existe una solución: el anillo de sonares.

El anillo de sonares nos permite tener una mejor percepción del entorno de un robot móvil debido a que tiene un rango de percepción más amplio como también la disminución de errores en la detección de obstáculos. La disminución de errores en la detección de obstáculos se debe a que con el anillo de sensores se aumenta el rango de sensado permitiendo mayor detección en el entorno de funcionamiento. En la *Figura 9.a* se puede observar la distribución de sensores sonar para la generación del anillo y en la *Figura 9.b* se puede observar la reflexión que presenta cada sonar en funcionamiento el anillo.

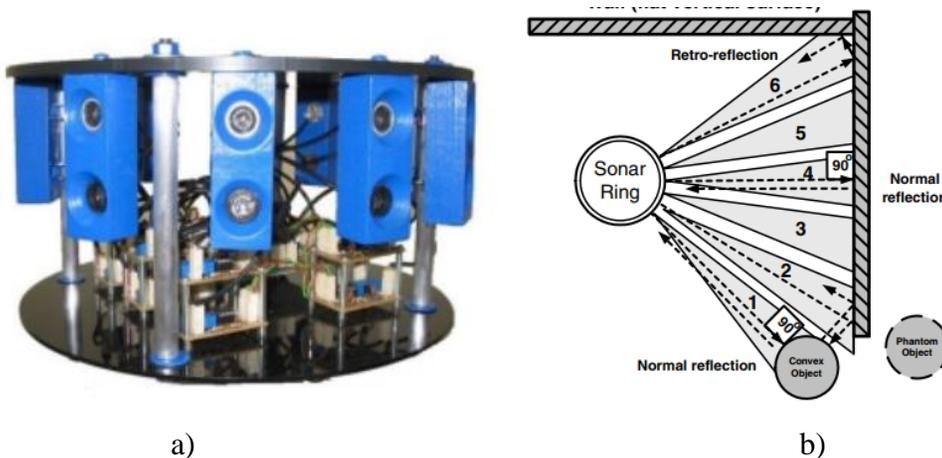


Figura 9. a) Anillo de Sonares. b) Modo Reflexión del anillo de sonares.
Fuente: (Cordoba L & Mejía L , 2004), (Holland, 2004).

En la distribución de los sensores sonar se debe tomar en cuenta el rango o cobertura que tiene cada uno de los sensores en la generación de la trayectoria. En la *Figura 10* se muestra el rango de funcionamiento de un anillo de sonares y se puede observar que a la altura a la cual está trabajando tiene un problema en la detección de obstáculos tales como escaleras y mesa (Holland, 2004).

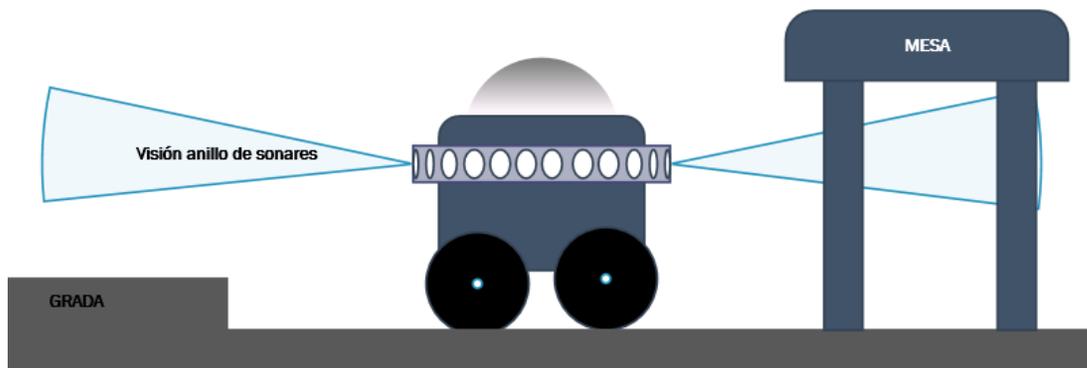


Figura 10. Cobertura de un anillo de sonares.

2.3.2. LIDAR

El LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) es un sensor basado en el mismo principio del sonar, es decir, envía pulsos de luz ininterrumpidamente y capta sus retornos o rebotes. El sensor LIDAR por la intermitencia que genera tiene más confiabilidad que un sonar por lo que es aproximado a un anillo de sonares.

El sensor LIDAR es utilizado en robots móviles aéreos y terrestres. Al ser un dispositivo con altas prestaciones su forma mecánica es compleja y es muy sensible ante colisiones. En los robots aéreos de modelado tridimensional se utiliza un sensor LIDAR el cuál acompañado de un sistema de ubicación GPS para posicionamiento o un sistema de medidas inerciales IMU para orientación. En la *Figura 11* se puede observar el mapeo de una superficie a través de un robot móvil.

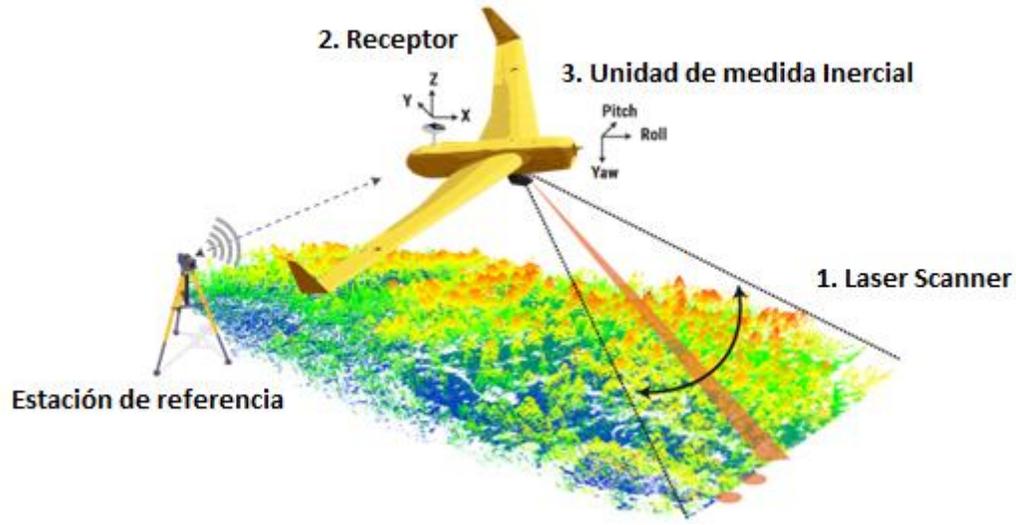


Figura 11. Aplicación de LIDAR en robots aéreos, Mapeo.
Fuente: (YellowScan, 2004)

En los robots terrestres se lo utiliza para realizar mapeo con un ángulo de visión de 360° , lo que a un robot móvil le provee una mejor percepción para lograr un mapeo 2D, con los datos que se generan a partir del sensor y con los cuales se obtendrán las características del entorno. En la *Figura 12* se puede observar un mapeo a través de un robot móvil utilizando un sensor LIDAR.

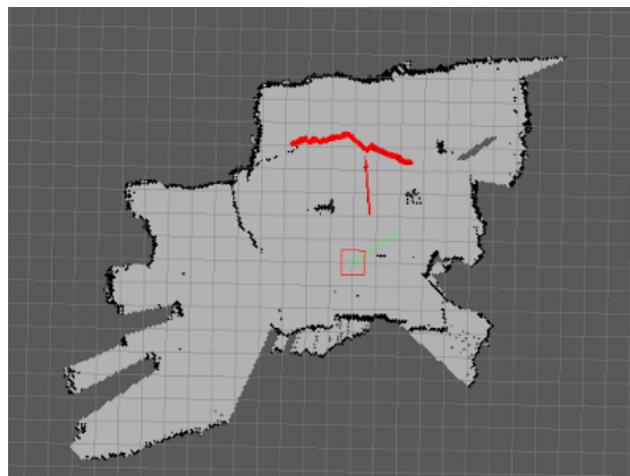


Figura 12. Mapeo con un sensor LIDAR.
Fuente: (Bailey, 2006)

2.3.3. Kinect

Kinect (Microsoft, s.f.) es un dispositivo de visión el cual fue desarrollado inicialmente para videojuegos específicamente consolas de Xbox. Pero con el desarrollo e investigaciones se ha adaptado para aplicaciones como la robótica móvil para mapeo, navegación y visión artificial (Ruiz Sarmiento, Galindo , Gonzalez Jimenez, & Blanco, 2011). La Kinect está provista de una cámara RGB, un sensor de profundidad, una matriz de micrófonos y una base motorizada que le permite un movimiento de cabeceo. Además, posee una serie de giróscopos que aportan información sobre su orientación. En la *Figura 13* se puede observar la distribución del sensor Kinect.



Figura 13. Sensor Kinect
Fuente: (Galindo & Ruiz- Sarmiento, 2010)

En la robótica móvil tomando una de las aplicaciones que se puede realizar con el dispositivo KINECT por sus prestaciones es la generación de SLAM y navegación reactiva. Se debe tomar en cuenta el alto coste computacional que requiere el procesamiento de imágenes con información de profundidad.

2.4. Localización de un robot móvil

La localización de un robot móvil como se ha visto es una de las partes más importantes de la navegación. Es importante para la navegación y generación de trayectorias de desplazamiento dentro de un entorno conocido o desconocido en funciones de exploración. (Vallés Miquel & Valera Fernández, 2014)

2.4.1. Localización Global

La localización global o también conocida como localización absoluta es utilizada para la ubicación del robot respecto a un punto fijo de referencia. La localización global utiliza el sistema de posicionamiento global o GPS. El sistema GPS es capaz de determinar la posición del robot, es decir, se puede determinar su latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar en la que se encuentra el Robot.

El sistema de localización global no es muy utilizado para localización en interiores. La principal característica que hace posible que la localización global no sea utilizada para entornos internos es debido a la precisión de los dispositivos GPS.

2.4.2. Localización Local

La localización local nos permite ubicar al robot de manera relativa con respecto al entorno, es decir, se puede determinar la posición con respecto a posiciones anteriores (Gallardo López, 1999). Es utilizado ya que se tiene menor error en la precisión de la ubicación del robot. El robot es capaz de localizarse mediante un sistema sensorial que le permite conocer su entorno y desarrollar la ubicación por sí mismo.

En la localización local se tiene el problema del seguimiento del estado del robot que es causado por los errores del sistema sensorial del robot. (Siegwart & Nourbakhsh, 2011)

2.5. Métodos probabilísticos de corrección de localización

En el entorno de un robot móvil, uno de los problemas más característicos es la pérdida de información. La pérdida de información ocasiona datos incoherentes para el procesamiento en la localización del robot. Dicho problema hace que el robot se encuentre en un estado de incertidumbre y no pueda identificar correctamente su posición.

Se han desarrollado diferentes métodos para realizar la corrección de la incertidumbre que se genera en un robot móvil (Gallardo López, 1999). Cada método logra una mejor discretización del entorno del robot por medio de su sistema sensorial o sistema de percepción.

Dentro de los diversos métodos que existen para la reducir la incertidumbre de localización en un robot móvil se analizará los siguientes métodos:

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

2.5.1. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo mediante el cual se estima un estado futuro a partir una medición de datos obtenidos. (Mattamala Aravena, 2013) El algoritmo de Kalman fue desarrollado por Rudolf E. Kalman en el año de 1960.



Figura 14. Esquema general del Filtro de Kalman.

En la figura 14 se puede observar el esquema general del filtro de Kalman en el cual podemos observar a un sistema con sus respectivas entradas como señal de control y fuentes de error (Siegwart & Nourbakhsh, 2011). Posteriormente se observa la medición del entorno a través de dispositivos de medición con el acarreo de errores de medición. El filtro de Kalman obtenemos una estimación óptima del estado del sistema, en el cual se corrige los errores de medición de los dispositivos. Para el filtro de Kalman se debe tener en cuenta los siguientes componentes:

- Vector de Estado
- Modelos Dinámico
- Modelo de Observación.

Vector de Estado

El vector de estado es básicamente la que contiene las variables de más interés del modelo. Las variables del vector de estado son deducidas a partir de valores que pueden ser medidos tales como posición, velocidad o ángulos de orientación. A continuación, en la ecuación (2), se ejemplifica un vector de estado donde sus variables son la distancia y velocidad.

$$x = \begin{bmatrix} s \\ v \end{bmatrix} \quad (2)$$

El vector de estado tiene también dos momentos tanto el valor anterior o a priori, el cual es obtenido de primer momento y luego el valor a posteriori o valor a corregir. Cada uno denota al vector de estado en su valor a priori por x^- y en su valor posteriori por x^+ (Pereira Ruíz, 2016).

Modelo dinámico

El modelo dinámico es la transformación del vector de estado a lo largo del tiempo. Por lo cual se tiene una al vector de estado en función del tiempo como se muestra en la ecuación (3).

$$\dot{x}(t) = \frac{d}{dt}x(t) = f(x(t), m(t)) \quad (3)$$

Modelo de Observación

El modelo de observación es la relación entre el estado y las mediciones obtenidas para las variables del vector de estado. El filtro de Kalman extendido se caracteriza por tener dos etapas en las que se realiza el filtro. Las etapas del filtro de Kalman extendido son:

- Etapa de predicción
- Etapa de corrección

En la etapa de predicción el filtro Kalman se ocupa por el modelo dinámico, mientras la etapa de corrección se la realiza con el modelo de observación. Con las dos etapas descritas se garantiza un estimador óptimo a lo largo de tiempo por lo que también se lo conoce como un filtro recursivo

(Gallardo López, 1999). En la *Figura 15* se puede observar la interacción de las etapas del filtro Kalman, tanto en su etapa de predicción como en su etapa de corrección.

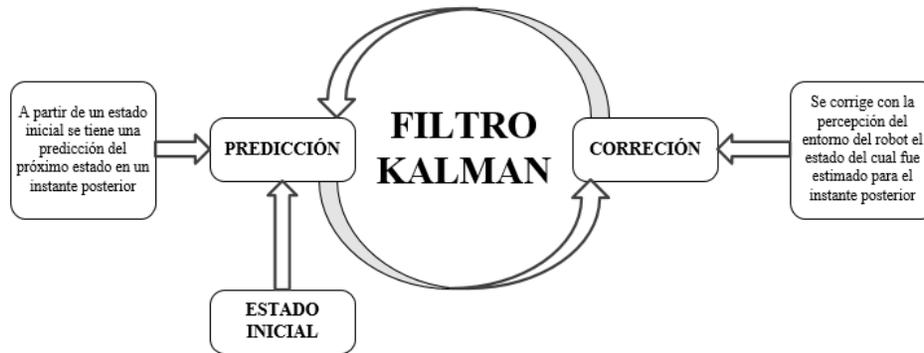


Figura 15. Circuito del filtro Kalman

El filtro de Kalman es aplicado con frecuencia modelos de sistemas lineales, para sistemas no-lineales se utiliza una variación del filtro. En la *Figura 16* se muestra el algoritmo del filtro de Kalman.

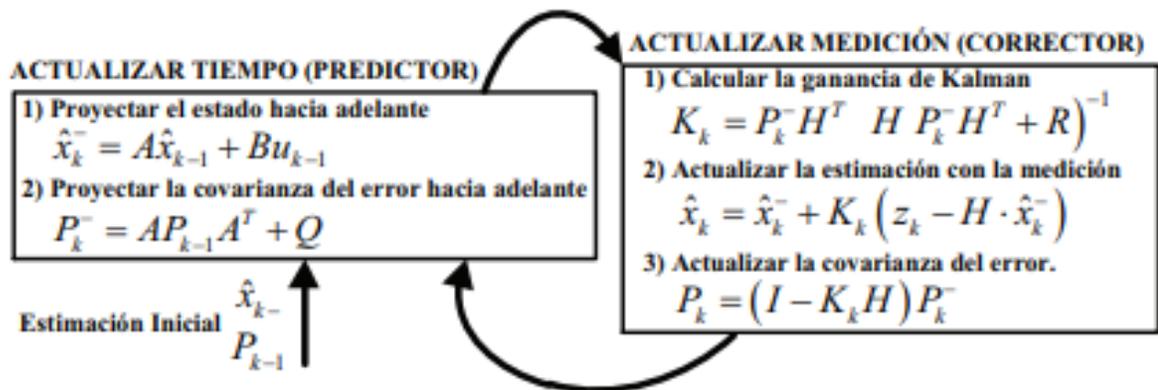


Figura 16. Algoritmo del filtro Kalman.

Fuente: (Marín Paniagua, 2011)

Etapa de Predicción

La etapa de predicción es el primer paso dentro del filtro de Kalman. En él se calcula el estado anterior o priori mediante la resolución de las ecuaciones diferenciales descritas por el modelo dinámico. En la ecuación (4) se muestra la ecuación a resolver para la etapa de predicción.

$$\dot{x}^+(t_i) = F \cdot x^-(t) \quad (4)$$

Etapa de Corrección

En la etapa de corrección se mejora el vector de estado en $x^-(t_i)$, con el modelo de observación por medio de las mediciones realizadas en el instante de tiempo t_i . En la ecuación (5) se muestra resolución de la etapa de corrección.

$$x^+(t_i) = x^-(t_i) + \Delta x(t_i) \quad (5)$$

2.5.2. Filtro de Kalman Extendido

El conocido filtro de Kalman es usado para estados lineales, pero a la vez para sistemas no-lineales se tiene la variación conocida como filtro de Kalman extendido (Mattamala Aravena, 2013).

El filtro de Kalman extendido fue desarrollado por Stanley F. Schmidt después que Kalman presentará los resultados sobre filtro Kalman. El estudio del filtro de Kalman extendido se dio ante el problema de navegación espacial.

Dentro del filtro de Kalman extendido se maneja las mismas etapas que se maneja en el filtro Kalman, tanto la etapa de predicción como la etapa de corrección. Al ser un sistema no lineal el

sistema debe estar representado en forma de funciones diferenciables. El método de resolución es igual al del filtro de Kalman, su algoritmo se muestra en la Figura 17 .

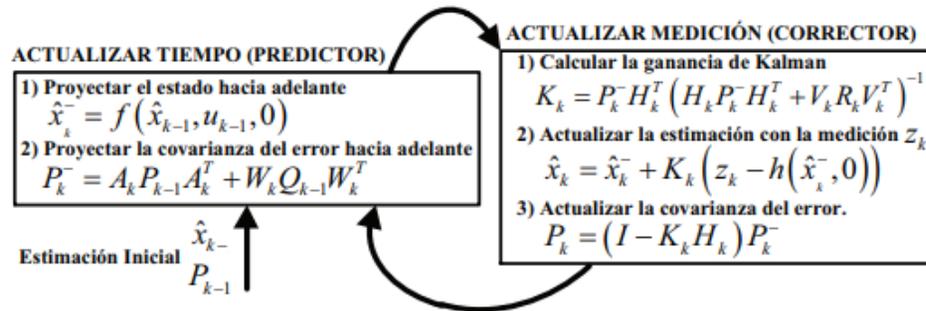


Figura 17. Algoritmo del filtro de kalman Extendido.

Fuente: (Marín Paniagua, 2011)

2.5.3. Filtro de partículas

El filtro de partículas es un método utilizado para la estimación de un sistema que cambia a lo largo del tiempo. El filtro de partículas utiliza los métodos del Montecarlo el cual consiste en la aproximación de expresiones matemáticas de alta complejidad con gran exactitud, es decir, con el filtro de partículas se intenta aproximar la distribución de la probabilidad. (Gallardo López, 1999). Dentro del filtro de partículas intervienen cuatro componentes esenciales para ejecutar dicho método.

2.5.3.1. Componentes del filtro de Partículas

Partículas

Al igual que el vector de estado en el método de filtro Kalman, las partículas se refieren a cada uno de los estados que se obtienen en el sistema (Rodríguez Moya , 2009). Las partículas del

sistema a lo largo del tiempo forman una curva probabilística. En la Ecuación 6 se puede observar la denotación de las partículas de un sistema.

$$x_1, x_2, \dots \dots \dots, x_n \quad (6)$$

En las partículas se toma en cuenta dos estados por cada uno de ellos, el estado actual y el estado estimado. El estado actual es denotado por la ecuación 7, mientras que el estado estimado es denotado por la ecuación 6.

$$x_1^-, x_2^-, \dots \dots \dots, x_n^- \quad (7)$$

Pesos probabilísticos

Los pesos probabilísticos son los valores numéricos que indican la probabilidad que las partículas se repitan en el siguiente estado. Los pesos probabilísticos al igual que las partículas se observa en su estado actual (ecuación 8) y su estado de actualización (ecuación 9).

$$w_1^-, w_2^-, \dots \dots \dots, w_n^- \quad (8)$$

$$w_1, w_2, \dots \dots \dots, w_n \quad (9)$$

Modelo de Observación

Al igual que en el Filtro de Kalman el modelo de observación es un sistema vectorial en el cual se encuentra toda la percepción que tiene el autómata acerca del entorno.

Modelo de Control

El modelo de control representa todas las acciones que se entregan a los actuadores del autómata.

2.5.3.2. Etapas del filtro de partículas

El filtro de partículas consta de cuatro etapas en la ejecución de su algoritmo. Las cuatro etapas en las que se desarrolla el filtro de partículas son:

- Etapa de inicialización
- Etapa de actualización
- Etapa de estimación
- Etapa de predicción

En la Figura 18 se muestra las etapas del filtro de partículas, mostrando la interacción de cada una de las etapas con el conjunto de partículas.

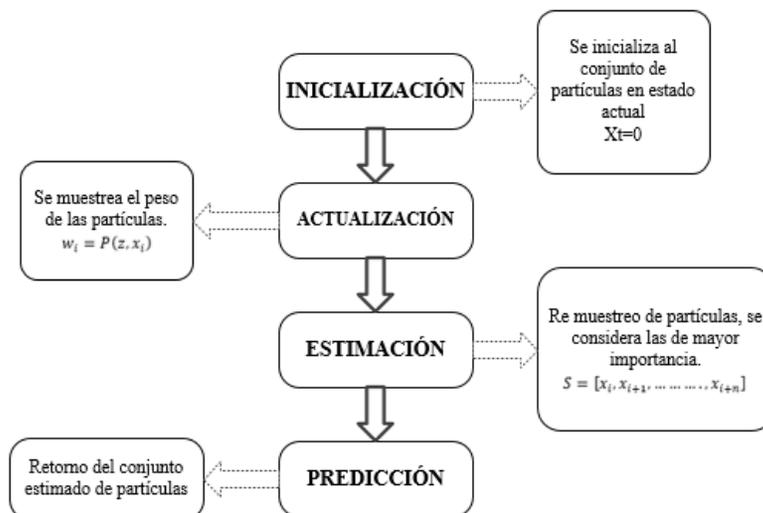


Figura 18. Esquema de etapas del filtro de partículas.

Etapa de inicialización: el filtro de partículas lanza un conjunto de puntos al azar, por lo que la etapa de inicialización se crea un conjunto de partículas en el estado actual del sistema o modelo, teniendo un conjunto de partículas en el estado actual (ecuación 10).

$$S^- = [x_i^-, x_{i+1}^-, \dots \dots \dots, x_{i+n}^-] \quad (10)$$

Etapa de actualización: en función del estado de cada una de las partículas se les asigna un nuevo peso probabilístico según su similitud al estado de referencia o estado actual (Rodríguez Moya , 2009). La etapa de actualización es lograda a través del sistema sensorial del autómata y se obtiene los valores de actualización como se muestra en la ecuación 11.

$$x_i = P(x_i | u, x_i^-) \quad (11)$$

$$w_i = P(z, x_i) \quad (12)$$

Donde u es el modelo de control y z es el modelo de observación, con ellos se obtiene el valor de actualización, así como su respectivo peso probabilístico.

Etapa de estimación

A partir de los valores y con los pesos probabilísticos diferentes a los iniciales, se creará un nuevo conjunto de partículas. Para la obtención de estas nuevas partículas se genera un re muestreo probabilístico en el cual se considera las nuevas partículas que reemplazarán a las partículas iniciales. En otras palabras, la etapa de estimación reemplaza a la etapa de inicialización (ecuación 13).

$$S = [x_i, x_{i+1}, \dots \dots \dots, x_{i+n}] \quad (13)$$

Etapas de predicción

Con la obtención del nuevo conjunto de partículas que se aplican en el nuevo instante se procede a ver la variabilidad del sistema para con ello poder predecir o estimar el estado del sistema en el instante siguiente o posteriori. (Rodríguez Moya , 2009)

2.6. Mapeo y Localización Simultáneo

El mapeo y localización simultánea (SLAM), es un tema de investigación desde los comienzos de la robótica móvil. El SLAM puede ser implementado en robots de interiores, exteriores, subacuáticos y aéreos.

El mapeo y localización simultánea es una técnica para la construcción de mapas de un entorno, el SLAM utiliza las técnicas de localización y navegación. El robot al generar el SLAM es capaz de conocer su ubicación dentro del mismo mapa que va creando.

2.6.1. Tipos de SLAM

Para la resolución del problema de SLAM existen diferentes métodos que pueden ser aplicados para la realización de mapeo y localización simultáneos.

EKF SLAM

Uno de los métodos más utilizados es el Filtro de Kalman extendido (EKF). El filtro de Kalman extendido es una de las soluciones más conocida y utilizada a los problemas de localización y mapeo simultáneo (SLAM) (Mattamala Aravena, 2013). El filtro de Kalman es aplicado en cada una de sus etapas para que el autómata tenga la posibilidad de generar un correcto mapeo y a su vez una correcta localización.

El EKF SLAM ha quedado sobresaltado en los últimos años por el método del filtro de partículas.

FastSLAM

El FastSLAM es un método que actualmente se utiliza sobre el filtro EKF debido que combina el filtro de partículas con el filtro EKF, con lo que se obtiene un mejor resultado en el posicionamiento del autómata. El algoritmo de FastSLAM funciona de tal manera que todas las partículas se inician en la posición conocida del robot., permitiendo tener una mejor localización con el algoritmo del filtro de partículas en las etapas de estimación. (Gómez Gómez , 2015)

El FastSLAM ha tenido un desarrollo en el cual se ha ido mejorando en las etapas de los métodos que se utilizan para el mapeo y localización simultánea. En su primera versión se obtuvo al FastSLAM 1.0 el cuál mejoro el método del filtro Kalman con la inclusión del filtro de partículas para posterior dar pasa a otra versión conocida como FastSLAM 2.0 (Mangas, 2007).

El FastSLAM 2.0 implementa una mejora en la etapa de predicción, la mejora que se presenta es debido a que la información del sensado se utiliza como parte del modelo de desplazamiento del robot.

LSD-SLAM (LARGE-scale direct monocular SLAM)

El LSD-SLAM es un método por el cual se puede construir mapas a gran escala. En particular trabaja directamente sobre el contraste de las imágenes tanto en localización como para el mapeo. Al trabajar directamente sobre las imágenes el LSD-SLAM tiene mucha más información sobre la geometría y el entorno, por lo que para los robots es de gran utilidad (Arrue Ullés, 2016)

2.6.2. SLAM en ROS

El framework ROS al ser un sistema dedicado a la robótica nos permite el uso de diferentes paquetes facilitando el desarrollo de la robótica. Existen diferentes paquetes dedicados para la realización de SLAM (Rodríguez , 2017), entre los más destacados son:

- Hector SLAM
- SLAM Gmapping

Cada uno de los paquetes o métodos que se encuentra en ROS poseen una diferencia en su funcionalidad.

Hector SLAM

La generación de SLAM a través del paquete Hector SLAM hace uso de 2D SLAM, el cuál a través de un sensor laser genera el procesamiento y mapeo del entorno logrando localizarse a través del movimiento del sensor (Rodríguez , 2017).

SLAM Gmapping

El paquete o método de SLAM Gmapping es un paquete que hace uso del FastSLAM 2.0 el cual genera el mapeo a través de un sensor laser y su localización a través del sistema sensorial del robot (Iralab, s.f.).

2.7. Navegación reactiva

Navegación reactiva es una estrategia de navegación en los robots móviles, donde tienen la capacidad de responder a estímulos del entorno al evitar obstáculos (Ruiz, Galindo, Gonzalez, & Blanco, 2011).

Navegación reactiva trata el problema del movimiento tanto autónomo como controlado de un robot móvil, en especial en el caso de navegación en interiores como pasillos, habitaciones, ingresos, etc. Donde existen muchos obstáculos como: mesas, muebles, electrodomésticos, puertas, sillas, personas, etc.

El robot debe tener la capacidad de navegar detectando los obstáculos a través de sus sensores, luego tomar decisiones para librar el obstáculo a través de un algoritmo y ordenar a su sistema de locomoción actuar con una trayectoria diferente.

Existen investigaciones en navegación reactiva usando distintos algoritmos por ejemplo: navegación reactiva basado en cámaras KINECT (Ruiz, Galindo, Gonzalez, & Blanco, 2011), basado en sonares (Elfes, 1987) , basado en sensor LIDAR (Jiechao, Paramsothuy, Jeffrey, & Tulga, 2014) .

Entre los métodos usados para la resolución del problema están: navegación reactiva por control Fuzzy (Takeuchi, Nagai, & Enomoto, 1998) (Hagras, 2004), navegación reactiva por algoritmos genéticos y generación de trayectorias (Han, Baek, & Kuc, 1997) (Tian & Collins, 2003), navegación reactiva por el método de campos potenciales, (Martínez & Sisto, 2009)

Existe también el enfoque de la ventana dinámica “Dynamic Window Approach” (Fox, Burgard, & Thrun, 1998), el cual es un algoritmo de navegación en base a el conocimiento del entorno para ambientes dinámicos y no dinámicos, el cual es utilizado para evadir obstáculos mientras el robot móvil se mantiene navegando.

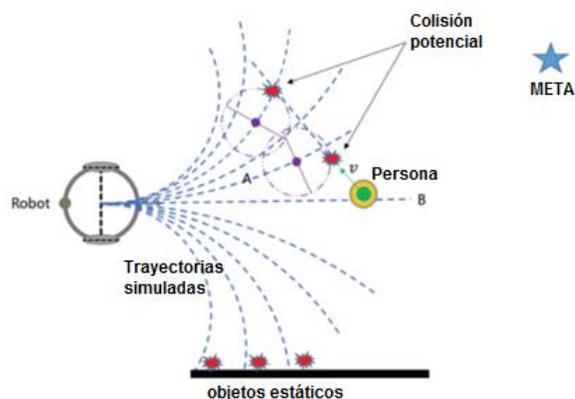


Figura 19. Trayectorias simuladas por el algoritmo DWA para navegación
Fuente: (Chen, Wu, Shuai, & Chen, 2017)

En la *Figura 19* se puede observar el resultado de uso del algoritmo DWA para navegación, se muestran trayectorias posibles simuladas, de dichas trayectorias se selecciona la mejor combinación de comandos de velocidad y aceleración para acercarse cada vez a la meta (Chen, Wu, Shuai, & Chen, 2017).

El algoritmo DWA permite evitar obstáculos tomando la mejor alternativa en ruta y con la máxima velocidad de navegación (Brock & Khatib, 1999).

2.8. Planificador de Trayectoria

La planificación de la trayectoria busca encontrar una secuencia de posiciones para un robot móvil, que permitan llevarlo de un lugar o estado inicial a uno final. Los estados son descritos como la ubicación del robot respecto a un marco de referencia absoluto. (Universidad de Santiago de Chile)

Los robots móviles, luego de haber obtenido su modelo cinemático es posible definir el movimiento, de tal manera que el robot siga un camino preplanificado de un entorno ya explorado, es decir, de un entorno del que se tiene un mapa generado a través de SLAM.

Para que el robot pueda seguir caminos preplanificados es requerido que se hayan establecido dos tipos de control que son: (Saltarén Pazmiño, Azorín Poveda, Almonacid Kroeger, & Sabater Navarro, 2013)

- Control cinemático: Requerido para describir cualquier desplazamiento deseado, es establecido como una secuencia de puntos en el plano. Se lo realiza mediante interpolaciones de la ruta para generar la secuencia de puntos en el tiempo.
- Control dinámico: Permite que el robot siga realmente las rutas, tomando como base el control cinemático y estableciendo las limitaciones de los actuadores

Los métodos de planificación se fundamentan en la construcción de grafos, según la información del entorno.

Entre los métodos para la obtención de trayectorias están: Planificación basada en grafos de visibilidad, basada en diagramas de Voronoi, basada en modelado del espacio libre, basada en la descomposición en celdas, basada en campos potenciales.

2.8.1. Planificación basada en grafos de visibilidad

El método se basa en modelar los obstáculos por polígonos, el concepto de visibilidad se basa en la definición de una línea recta entre dos nodos de los obstáculos, tomando en cuenta la posición inicial y final, como lo muestra la *Figura 20*. (Han, Baek, & Kuc, 1997)

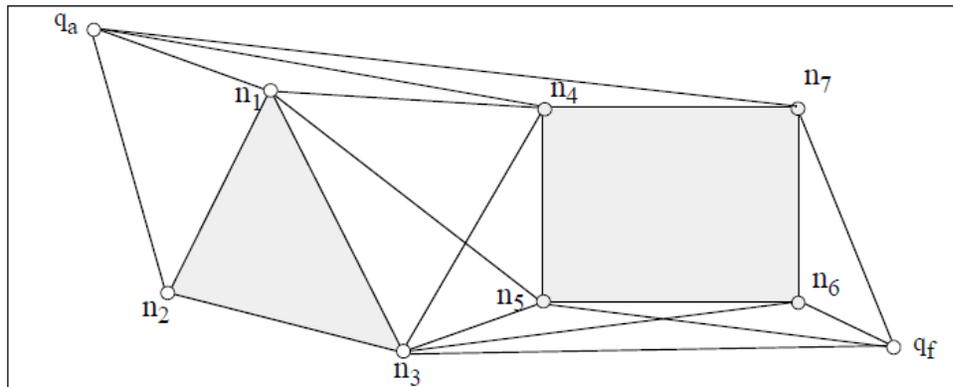


Figura 20. Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos
Fuente: (Muñoz Martínez, 1999)

Los segmentos trazados corresponden al espacio libre, por el cual se puede trazar arcos tomando como base los puntos visibles (LaValle, 1998). El método basado en grafos posee un bajo coste computacional, pero tiene limitaciones, ya que considera al robot como un punto y no con sus dimensiones reales. (Muñoz Martínez, 1999)

2.8.2. Planificación basada en diagramas de Voronoi.

El método planifica en base a diagramas de Voronoi, la cual sitúa la ruta lo más alejada de los obstáculos, así se elimina el problema de no considerar las dimensiones del robot.

El diagrama de Voronoi es un lugar geométrico de las configuraciones que se encuentran a igual distancia de los dos obstáculos más próximos del entorno (Muñoz Martínez, 1999). El diagrama está formado por segmentos rectilíneos y parabólicos, como lo muestra la *Figura 21*.

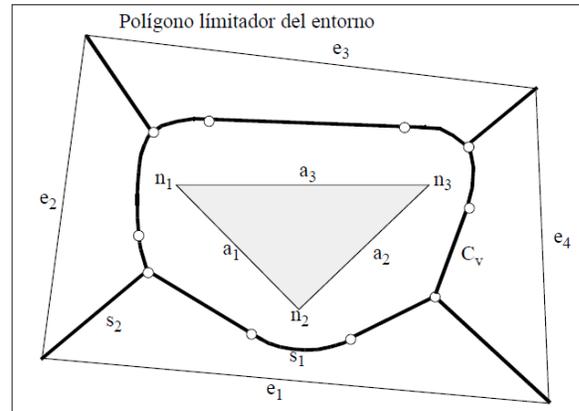


Figura 21. Retracción del espacio libre en un diagrama de Voronoi.

Fuente: (Muñoz Martínez, 1999)

Los segmentos se construyen de manera equidistante de todos los obstáculos, tomando en cuenta aristas y vértices para saber el segmento recto o parabólico.

2.8.3. Planificación basada en modelado del espacio libre

El modelado del espacio libre se realiza mediante cilindros rectilíneos generalizados (CRG), y pretende que el vehículo navegue alejado de los obstáculos.

Los CRG se construyen a partir de aristas de los obstáculos, tomando en cuenta unas condiciones que deben cumplir, los CRG se construyen y el robot navegará por el eje del cilindro como lo muestra la Figura 22.

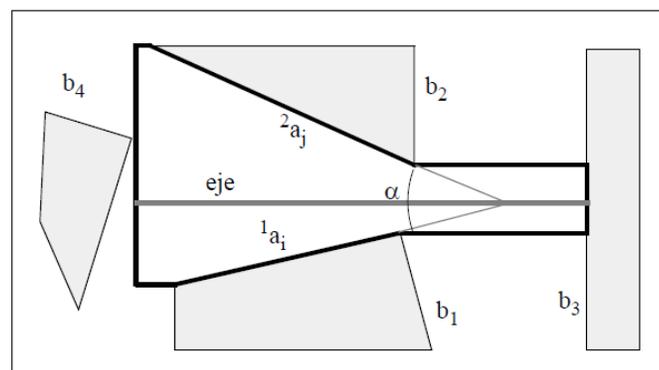


Figura 22. Construcción de un CRG.

Fuente: (Muñoz Martínez, 1999)

2.8.4. Planificación basada en la descomposición en celdas

Descomponer el espacio libre en celdas, así la ruta desde una posición inicial a una final consiste en buscar una sucesión de celdas que no presente discontinuidades. (Muñoz Martínez, 1999)

Las celdas dan información de los lugares libres, y se buscan celdas de geometría simple y la inspección de celdas adyacentes también debe ser simple.

El grafo de conectividad debe ser buscado, consiste en buscar nodos que unan a las celdas obteniendo una red de celdas interconectadas entre sí, como lo muestra la *Figura 23*.

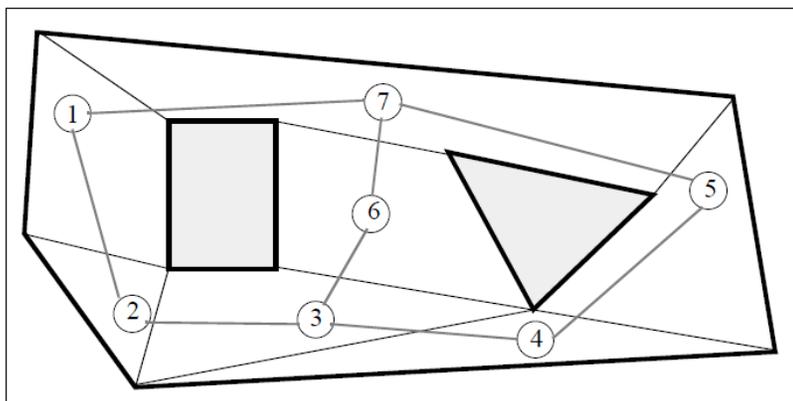


Figura 23. Descomposición en celdas y grafo de conectividad.
Fuente: (Muñoz Martínez, 1999)

La búsqueda de las celdas puede realizarse de manera más sencilla, trazando líneas paralelas al eje “y” a partir de cada vértice de los obstáculos, luego para obtener los grafos de conectividad se unen todos los puntos medio de los segmentos verticales, como lo muestra en la *Figura 24*.

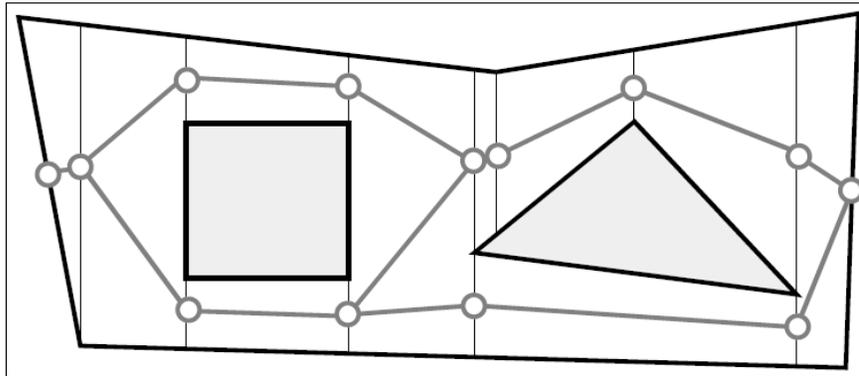


Figura 24. Grafo de conectividad de una descomposición trapezoidal.
Fuente: (Muñoz Martínez, 1999)

2.8.5. Rapidly Exploring Random Tree

Desarrollado en 1998 por Steven M. LaValle, propone una exploración aleatoria de trayectorias desde una configuración inicial hacia una configuración final o meta (LaValle, 1998).

El método construye un árbol de configuraciones que explora todas las regiones libres de obstáculos del mapa, posteriormente en un pos-procesado se establece una búsqueda para calcular el camino más corto y mejorar las trayectorias.

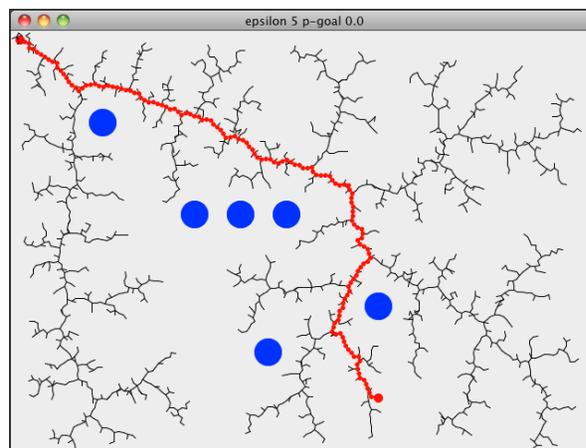


Figura 25. Ejemplo de construcción de espacio de configuraciones RRT, con postprocesado.
Fuente: (Nakkaya, 2009)

Como se muestra en la *Figura 25*, el árbol de configuraciones abarca totalmente la extensión del mapa donde se visualizan los obstáculos de color azul, las ramas se detienen hasta encontrar un obstáculo y el proceso concluye cuando se alcanza la meta. La ruta post-procesada se visualiza en color rojo, la cual establece el camino más corto resultante de la unión de las ramas.

2.9. Estación de carga

Una de las tareas fundamentales del ser humano es el comer, auto recargarse de energía para poder realizar las tareas cotidianas, en los robots de manera similar se requiere de energía para poder realizar tareas, los robots móviles también requieren recargar sus baterías y en el caso de los robots móviles autónomos deben hacerlo de manera automática.

En la actualidad en robots comerciales existen algunos que poseen esa capacidad de auto recargarse, en el caso de los robots aspiradora, los cuales poseen una estación de carga fija a la cual reconocen y se posicionan una vez que se ha detectado un nivel bajo de carga de baterías, como lo muestra la *Figura 26*.



Figura 26. Robot aspirador Chuwi Ilife v7s.
Fuente: (Chuwivaccums.com)

Las estaciones de carga existentes permiten posicionar al robot dentro de los pines de carga, y también dar la orientación del mismo mediante marcas de posición, realizado a través de balizas de posición IR. Las balizas de posición IR envían mensajes periódicamente para que el robot pueda localizar la estación de carga.

Existen también otros tipos de estaciones que no solo permiten la carga, sino también el mantenimiento, el desarrollo como carga de programas nuevos, medición de potencia de motores, calibración de sensores, etc. (Swarm Robot, s.f.)

Características de una Estación de carga:

- Permite que el robot recargue sus baterías.
- Fuente de tensión regulada
- Dos contactos para el robot, (Power, Gnd)

Características de una Estación de mantenimiento:

Permite reprogramar el robot desde una computadora HOST, permite registrarse y verificar el estado de salud de cada robot.

- Permite al robot auto conectarse, recargarse y comunicarse con un Host.
- Fuente de tensión regulada y simple.
- Comunicación I2C.
- Cuatro contactos para el robot (Power, Gnd, Clk, Data)
- Microcontrolador para manejo de comunicaciones I2C.

Estación de desarrollo:

- Posee todas las capacidades de una estación de mantenimiento
- Dispositivo de captura para mantener el robot en su lugar
- Dinamómetro para permitir el funcionamiento estacionario de motores
- Codificadores de cuadratura en dinamómetros para permitir calibración de sensores.
- Emisores y detectores de IR para ejercitar los IR del robot.

2.10. Resumen

Los robots móviles son máquinas hechas para desplazarse por los medios como: aire, agua, tierra. De aquí surge la necesidad de dotar a los robots de autonomía, para que las personas no tengan que estar pendientes al 100% de las actividades del robot.

La percepción del entorno en un robot móvil se lo realiza mediante sensores como: sonar, Lidar, cámaras de video, cámaras 3D, entre otros, lo que permite emular el sentido de la vista en los seres humanos. Gracias a los sensores el robot puede tener conocimiento de objetos, profundidades, para evitar colisiones mientras se mantiene en navegación.

La cinemática del robot, junto con la resolución de la localización mediante odometría permite al robot situarse en un plano global, como punto de partida para la exploración de los entornos cerrados en los que el robot se desenvolverá. Para la corrección de la posición dada por la odometría existe el filtro Kalman Extendido.

La localización y mapeo simultáneo(SLAM) requiere conocer la posición del robot en un plano, mientras construye el mismo a través de los datos de su sistema de percepción. Para el problema de SLAM se consideran diferentes métodos por los cuales se puede dar solución tales

como: FastSLAM, EKF SLAM, LSD-SLAM entre otros. Cada uno de los métodos depende del sistema de percepción del cual este dotado el robot.

En la navegación de robots móviles es necesario una planificación de la trayectoria desde un punto de partida hacia una meta, dicha planificación se establece con la información del mapa y mediante algoritmos como: RRT, descomposición de celdas, planificación a través de grafos, modelamiento del espacio libre.

Es requerido un seguimiento de trayectoria planificada que incluya reaccionar frente a obstáculos dinámicos como personas y objetos, el algoritmo de navegación de enfoque de la ventana dinámica realiza este tipo de navegación.

La autonomía del robot en la presente investigación se basa en la aplicación de los componentes: mapping, localization, path planning, navigation, los cuales en su integración en conjunto con la estación de carga se obtiene un robot móvil autónomo, aun con limitaciones, pero con buenas bases para su posterior estudio en diversas aplicaciones.

Capítulo 3

Metodología y diseño

El capítulo muestra la metodología con la cual se realizará el rediseño de la plataforma y el enfoque en la autonomía del robot móvil, basado en el método de diseño concurrente. El modelo por utilizar se basa en el diseño y desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2013). De acuerdo con el método empleado se obtendrá el concepto más acorde a las necesidades que se plantean a continuación.

A partir de ello se plantearán alternativas para el rediseño de la plataforma robótica móvil y todo lo que con lleva dentro del problema de autonomía del robot. Con el análisis de cada una de las alternativas planteadas se procederá a realizar la definición del diseño en donde se obtendrán los posibles componentes a usar en el robot. Por último, se obtendrá el concepto final con el que se trabajará.

3.1. Definición de Necesidades

Se definen las características cualitativas esenciales para cumplir los objetivos planteados en el presente trabajo, las características, en principio se expresan como enunciados simples para ser analizadas e interpretadas para establecer características técnicas del robot.

Las necesidades obtenidas en el presente capítulo son tomadas a partir del análisis de la primera plataforma móvil para interiores SIMBA y el análisis de los objetivos propuestos, donde se propondrán mejoras en su diseño y funcionalidad.

Tabla 1*Necesidades de la plataforma robótica móvil para interiores.*

N°	Requerimientos
1	La plataforma móvil puede navegar en interiores (espacios pequeños)
2	La plataforma tiene autonomía energética.
3	La plataforma móvil reconoce su nivel de carga de baterías.
4	La plataforma móvil recarga sus baterías por sí misma.
5	La plataforma móvil puede cargar objetos sobre ella y movilizarlos dentro del espacio de trabajo.
6	La plataforma móvil reconoce desniveles del suelo para evitar caída en escalones.
7	La plataforma móvil tiene seguridad ante choques frontales y traseros.
8	La plataforma móvil puede navegar de manera autónoma y segura dentro del entorno.
9	La plataforma móvil puede realizar un mapa del entorno mientras se desplaza.
10	La plataforma móvil puede ser controlada de manera local o remota.
11	La plataforma móvil es de reducido peso.
12	La plataforma móvil es intuitiva de intuitivo funcionamiento.
13	La plataforma móvil navega a velocidades moderadas dentro de su entorno.
14	La plataforma móvil tiene un sistema electrónico embebido.
15	La plataforma móvil tiene una altura apropiada para la navegación del entorno.
16	La plataforma móvil es ergonómica y robusta
17	La plataforma móvil es silenciosa.
18	La plataforma móvil realiza variaciones suaves de velocidad.
19	La plataforma móvil puede realizar trayectorias curvas.
20	La plataforma móvil tiene su estación de carga.
21	La plataforma móvil puede indicar sus niveles de energía: alto, medio, bajo.
22	El robot móvil tiene soporte en plataformas de software libre.
23	La plataforma móvil puede realizar cambios de orientación en su mismo eje.

La Tabla 1 describe los requerimientos de la plataforma móvil para cumplir los objetivos planteados. En base a estas necesidades descritas, se obtendrán las especificaciones técnicas para plantear alternativas de solución.

3.2. Definición de especificaciones

Los requerimientos y necesidades descritas se analizan como un valor medible físicamente, por lo tanto, se establecen métricas que permitirán medir el grado de cumplimiento de los objetivos. (Ulrich & Eppinger, 2013)

Tabla 2

Especificaciones para necesidades con su respectiva métrica.

Necesidad	métrica	magnitud	unidad
1,5,7,8,10,16,23	Diámetro máximo	460	mm
1,5,6,8	Distancia mínima de desnivel	60	mm
1,7,8	Distancia mínima de seguridad	70	mm
1,6,8,9,10,15,16	Altura máxima	600	mm
1,7,8,19,23	Mínimo radio de curvatura	460	mm
1,5,8,9,13,16,18,19,23	Velocidad máxima	1,5	m/s
1,5,7,8,9,13,16,18,19,23	Aceleración máxima	1,0	m/s ²
5,7,8,10,11	Peso máximo de carga	10	Kg
5,7,8,10,11	Peso máximo de la plataforma	10	Kg
2,3,4,12	Capacidad de baterías mínimo	5	Ah
2,3,4	Voltaje de operación	24	V
1,12,17	Decibelios	80	dB
1,8,12,21	Color de estado energético	Rojo - Verde- Azul	RGB

3.3. Definición de subsistemas

Se plantea cubrir cada una de las necesidades de manera óptima, dentro del desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2013) uno de los pasos a seguir dentro de la generación de conceptos es descomponer el problema en problemas más sencillos o subsistemas más simples.

En la *Figura 27* se muestra el diagrama de las funciones que se tienen dentro de la ejecución del trabajo de la plataforma robótica móvil. Cada una de las funciones tienen un trabajo específico dentro de la plataforma, por lo que para el desglose de los subsistemas se agruparán las funciones de acuerdo con las dependencias entre cada uno de ellos.

En la *Figura 28* se muestra la agrupación de las funciones de la plataforma móvil para la generación de los subsistemas. Se obtienen 6 subsistemas con los cuales se trabajarán a lo largo del presente trabajo.

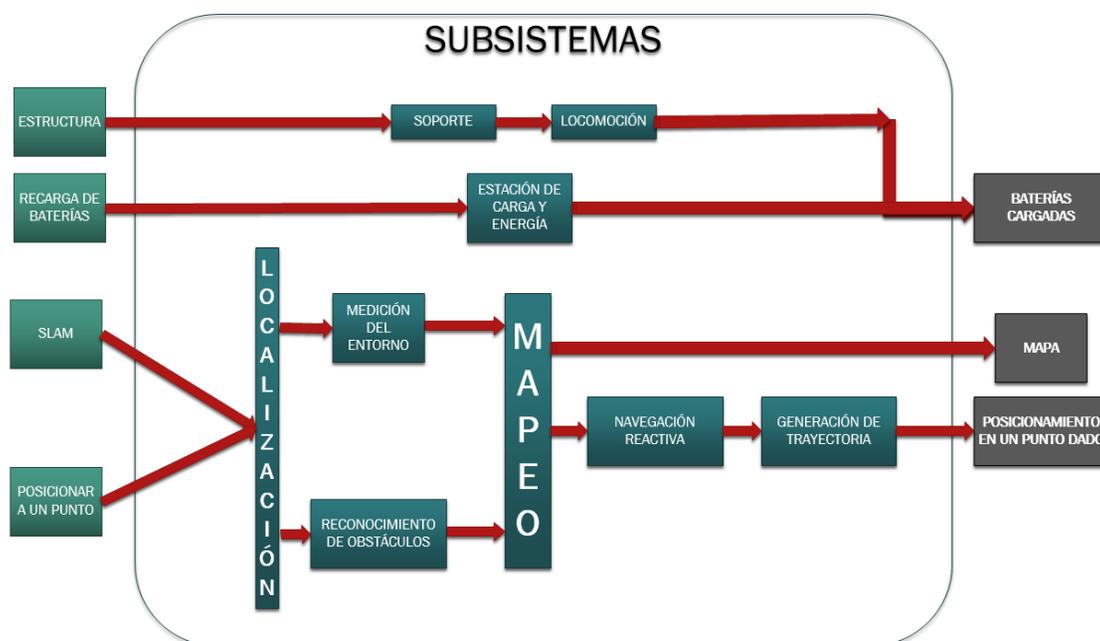


Figura 27. Desglose de funciones del robot móvil.

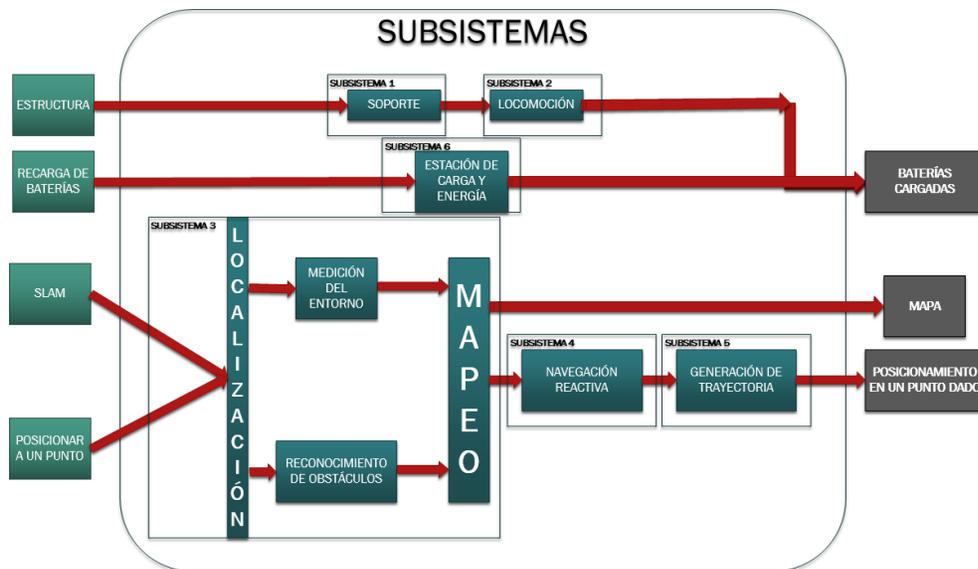


Figura 28. Subsistemas de la plataforma robótica móvil.

Con el desglose de los subsistemas (Tabla 3), se detalla a continuación las características de cada uno. Conjuntamente se obtendrán las posibles alternativas de solución a cada uno de los subsistemas permitiendo obtener un concepto final.

Tabla 3

Subsistemas del problema planteado.

#	Subsistemas
1	Estructura y soporte
2	Locomoción
3	Localización y mapeo
4	Navegación reactiva
5	Generación de trayectoria
6	Estación de carga

3.3.1. Subsistema 1: Estructura y soporte

El subsistema de estructura y soporte de la plataforma robótica móvil corresponde a la forma, distribución de elementos y subsistemas, dimensiones como resultado del rediseño integral del robot móvil recibido para el cumplimiento de los nuevos objetivos.

3.3.2. Subsistema 2: Locomoción

El subsistema de locomoción pretende cubrir esencialmente el movimiento de la plataforma, tomando en cuenta su distribución diferencial y los motores recibidos. En el sistema se establece el control cinemático y dinámico de los motores, también el establecimiento de la odometría en su etapa mecánica.

3.3.3. Subsistema 3: Localización y mapeo

El subsistema de localización y mapeo permite que el robot pueda saber dónde se encuentra, es decir, el robot puede ubicarse dentro de su entorno respecto a un punto de referencia.

El mapeo corresponde a la medición y obtención de datos de las características del entorno, los datos obtenidos se presentan en un plano mientras el robot realiza su movimiento.

3.3.4. Subsistema 4: Navegación Reactiva

El subsistema de navegación reactiva abarca la navegación propia, pero con el plus de autonomía y seguridad.

Permite que el robot pueda movilizarse en un ambiente conocido sin chocar con obstáculos presentes en interiores de manera autónoma.

3.3.5. Subsistema 5: Generación de trayectoria

El subsistema de generación de trayectoria permite en el robot móvil el movimiento desde un punto A hacia un punto B, el movimiento es realizado a partir de la generación de una ruta en un plano conocido.

El sistema debe ser capaz de generar la trayectoria más óptima, considerando las restricciones cinemáticas y dinámicas.

3.3.6. Subsistema 6: Estación de carga

El subsistema de estación de carga y energía, es el encargado de abastecer a la plataforma robótica móvil de energía. La plataforma móvil cuenta con dos baterías de 12 V cada una.

Tomamos en cuenta una de las necesidades más importantes, tales como la autonomía energética y la estación de carga de las baterías para el abastecimiento energético.

El robot móvil será capaz de movilizarse hacia la estación de carga una vez que sus baterías estén en un nivel bajo de energía, luego cargar sus baterías y poder realizar las tareas encomendadas.

3.4. Evaluación y selección de alternativas.

Con el análisis de cada uno de los subsistemas se pretende establecer las posibles alternativas que cubrirán las necesidades y requerimientos planteados para el presente trabajo. El análisis por realizar se lo hará para cada uno de los subsistemas, obteniendo las mejores alternativas dentro de la solución del problema planteado.

3.4.1. Subsistema 1: Estructura y soporte

En la selección de alternativas del subsistema de estructura y soporte se ha tomado en cuenta los requerimientos en la que plataforma robótica móvil puede ejecutar su trabajo dentro de un espacio de interiores, en donde su forma y tamaño no sea obstáculo de movilidad.

En el rediseño de la plataforma robótica móvil se han considerado 3 alternativas.

En la tabla 4 se realiza la ponderación de los 3 factores principales dentro del subsistema. Los factores para análisis son:

- Costo
- Tamaño
- Movilidad

Tabla 4

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 1.

CRITERIO	COSTO	TAMAÑO	MOVILIDAD	$\xi +1$	PONDERACIÓN
COSTO		2,5	2,5	6	33%
TAMAÑO	2,5		5	8,5	47%
MOVILIDAD	2,5	0		3,5	19%
			Sumatoria Total	18	100%

Obtenidas las ponderaciones de asignación de cada uno de los factores se presenta a continuación las alternativas de solución al subsistema de estructura y soporte.

En la *Figura 29* se puede observar 3 opciones de formas que se pretenden evaluar para el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil para interiores. Las 3 alternativas son:

- **Base Octogonal:** en los antecedentes mostrados de la plataforma de interiores se ha recibido una estructura de forma octogonal de 55 cm de diámetro circunscrito, para el nuevo diseño se pretende reducir el diámetro a 40cm.
- **Base Circular:** es uno de los diseños a analizar debido a su forma sencilla respecto a la movilidad y por su geometría apta para un sistema de locomoción diferencial.
- **Base Semi-Circular:** en la presente distribución se maneja una estética llamativa y al igual que en la geometría circular puede evadir obstáculos fácilmente.

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del diseño para la obtención del concepto final. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 5 hasta la Tabla 7.

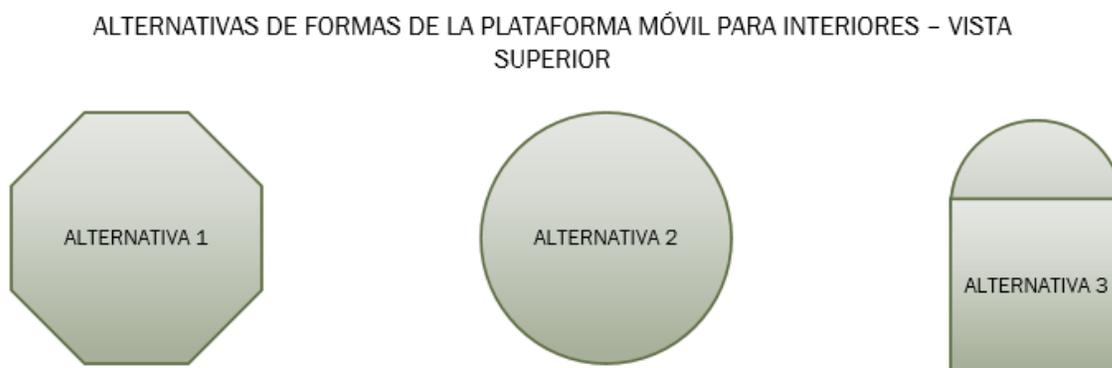


Figura 29. Alternativas de diseño de la plataforma robótica móvil para interiores.

Tabla 5

Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 1.

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		0	0	1	6%
ALTERNATIVA 2	5		2,5	8,5	47%
ALTERNATIVA 3	5	2,5		8,5	47%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 6

Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño del subsistema 1.

TAMAÑO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	0	3,5	19%
ALTERNATIVA 2	2,5		5	8,5	47%
ALTERNATIVA 3	5	0		6	33%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 7

Ponderación de movilidad para las alternativas de diseño del subsistema 1.

MOVILIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	0	3,5	19%
ALTERNATIVA 2	2,5		2,5	6	33%
ALTERNATIVA 3	5	2,5		8,5	47%
SUMATORIA				18	100%

En la Tabla 8 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final al igual que su respectivo diseño.

Tabla 8

Ponderación de Estructura y soporte de la plataforma móvil con las alternativas de diseño al subsistema 1.

	COSTO	TAMAÑO	MOVILIDAD	ξ total	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,019	0,092	0,038	0,148	15%
ALTERNATIVA 2	0,157	0,223	0,065	0,445	45%
ALTERNATIVA 3	0,157	0,157	0,092	0,407	41%

De la Tabla 8 la alternativa ganadora corresponde a diseñar una base con distribución circular.

3.4.2. Subsistema 2: Locomoción

En el subsistema de locomoción se analizan alternativas pretendiendo la mejor funcionalidad de la plataforma robótica móvil para interiores. Dentro de ellos se considera todos los posibles panoramas en los que la plataforma estará trabajando.

Dentro de los antecedentes de la plataforma robótica móvil se tiene que el robot posee un sistema de locomoción tipo diferencial usando dos ruedas locas, en el cual se tiene ubicadas a las llantas motrices en el centro del robot. Al realizar pruebas se detectaron varios problemas como la incapacidad de movimiento cuando el robot se mueve sobre cambios de suelo (alfombras, pequeños cambios de pendiente y cambios de piso).

En la locomoción diferencial hay varias alternativas como son: 4 ruedas motrices, 2 ruedas motrices y una rueda de soporte, 2 ruedas motrices y dos ruedas de soporte.

En el análisis de la plataforma se tiene 4 factores con los cuales se pretende que el robot tenga un óptimo funcionamiento a analizar a continuación.

En la Tabla 9 se realiza la ponderación de los 4 factores principales dentro del subsistema 2.

Los factores para análisis son:

- Costo
- Tamaño
- No pérdida de tracción
- Movilidad

Tabla 9

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 2

CRITERIO	COSTO	TAMAÑO	TRACCIÓN	MOVILIDAD	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
COSTO		5	2,5	0	8,5	29%
TAMAÑO	0		2,5	2,5	3,5	12%
TRACCIÓN	2,5	2,5		2,5	6	21%
MOVILIDAD	5	2,5	2,5		11	38%
				Sumatoria	29	100%

Obtenidas las ponderaciones de asignación de cada uno de los factores se presenta a continuación las alternativas de solución al subsistema de locomoción.

Se puede observar 3 opciones que se pretenden evaluar para el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil. Las 3 alternativas son:

- **Sistema Diferencial con una Rueda Loca:** se plantea que el robot cuente con un sistema diferencial de dos ruedas motrices, en la *Figura 30* se puede observar la distribución del sistema.

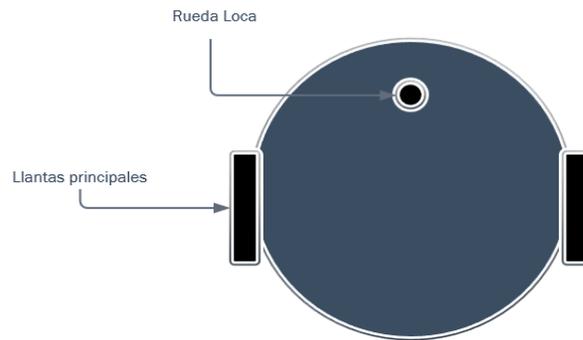


Figura 30. Sistema diferencial de una rueda loca y dos ruedas motrices

- **Sistema Diferencial con dos Ruedas Locas:** la plataforma robótica móvil para interiores en su primer diseño posee dos ruedas locas y dos motrices, por lo que se plantea el análisis con ruedas locas más grandes que las recibidas. En la *Figura 31* se presenta la distribución diferencial propuesta.

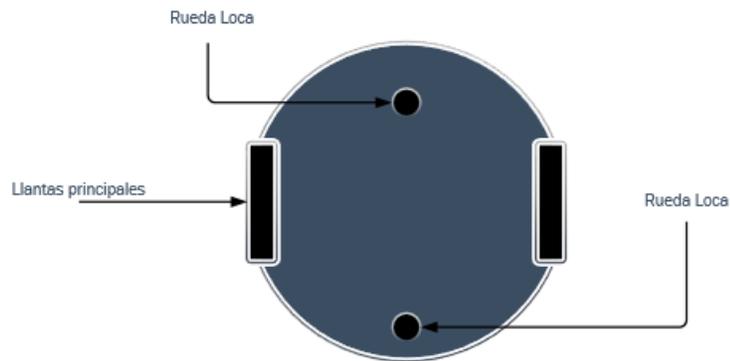


Figura 31. Sistema diferencial de dos ruedas locas.

- **Sistema Diferencial con cuatro ruedas motrices:** se tiene una configuración de cuatro ruedas motrices en las que dos de ellas reemplazan a una rueda loca de soporte. En la *Figura 32* se puede observar la distribución de las cuatro llantas motrices.

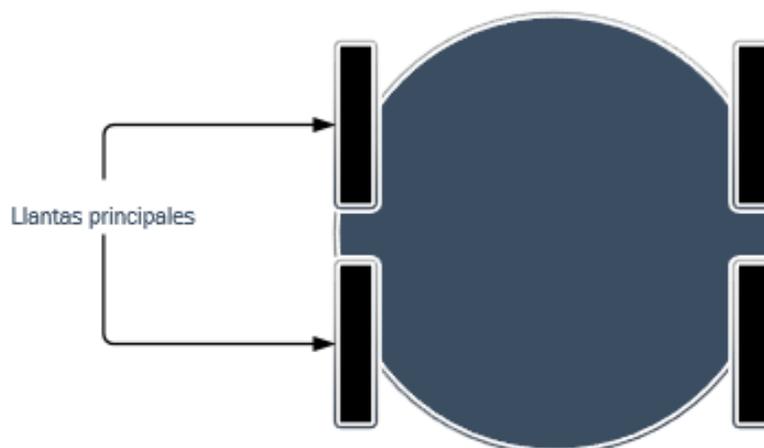


Figura 32. Sistema diferencial de cuatro llantas motrices.

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del diseño para la obtención del concepto final. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 10 hasta la Tabla 13.

Tabla 10

Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 2.

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	2,5		5	8,5	47%
ALTERNATIVA 3	0	0		1	6%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 11

Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño del subsistema 2.

TAMAÑO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	5	11	61%
ALTERNATIVA 2	0		2,5	3,5	19%
ALTERNATIVA 3	0	2,5		3,5	19%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 12

Ponderación de movilidad para las alternativas de diseño del subsistema 2.

MOVILIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	2,5	6	33%
ALTERNATIVA 2	2,5		2,5	6	33%
ALTERNATIVA 3	2,5	2,5		6	33%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 13

Ponderación de tracción para las alternativas de diseño del subsistema 2.

TRACCIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	0	6	33%
ALTERNATIVA 2	0		2,5	3,5	19%
ALTERNATIVA 3	5	2,5		8,5	47%
SUMATORIA				18	100%

En la Tabla 14 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final y su posterior diseño de detalle.

Tabla 14

Ponderación de locomoción de la plataforma móvil con las alternativas de diseño al subsistema 2.

	COSTO	TAMAÑO	TRACCIÓN	MOVILIDA D	ξ total	PONDERACIÓ N
ALTERNATIVA 1	0,138	0,074	0,069	0,126	0,408	68%
ALTERNATIVA 2	0,138	0,023	0,069	0,074	0,305	47%
ALTERNATIVA 3	0,016	0,023	0,069	0,179	0,288	56%

La alternativa ganadora es la alternativa 1: diseñar un sistema diferencial con una rueda loca de apoyo.

3.4.3. Subsistema 3: Localización y mapeo

Para el presente trabajo el subsistema de localización y mapeo es fundamental dentro del funcionamiento de la plataforma robótica móvil para interiores en su nuevo diseño, por ello se debe evaluar el sistema que posee de primera instancia.

La plataforma recibida realiza el mapeo del entorno mediante una cámara Kinect, la cual es capaz de mostrar imágenes incluyendo la profundidad a la que los objetos se encuentran.

En el algoritmo de mapeo las imágenes obtenidas con profundidad se convierten a un escaneo tipo láser que permite conocer la distancia a la que se encuentran los obstáculos en el rango permisible de la cámara.

Para cumplir las funciones del subsistema de manera optima se analizan factores claves para la evaluación de alternativas de solución para el diseño y concepto final de la plataforma robótica móvil para interiores.

En la Tabla 15 se realiza la ponderación de los 4 factores principales dentro del subsistema 3.

Los factores para análisis son:

- Costo
- Coste Computacional
- Angulo de Visión
- Implementación

Tabla 15

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 3.

CRITERIO	COSTO	COSTE COMPUTACIONAL	ÁNGULO DE VISIÓN	IMPLEMENTACIÓN	$\sum +1$	PONDERACIÓN
COSTO		5	0	2,5	8,5	25%
COSTE COMPUTACIONAL	0		2,5	0	3,5	10%
ÁNGULO DE VISIÓN	5	2,5		2,5	11	32%
IMPLEMENTACIÓN	2,5	5	2,5		11	32%
Sumatoria Total					34	100%

Obtenidas las ponderaciones de asignación de cada uno de los factores se presenta a continuación las alternativas de solución al subsistema de localización y mapeo.

Se puede observar 4 opciones que se pretenden evaluar para el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil para interiores, presentadas a continuación:

- **Sensor Kinect:** En el problema de Mapeo y localización simultanea(SLAM) el sensor Kinect es utilizado para realizar VisualSlam mediante su cámara RGB y su sensor de profundidad que realiza la proyección de rayos infrarrojos lo que permite obtener profundidades. Un detalle importante en el análisis del sensor Kinect es su campo de visión frontal horizontal el cual es de $57,7^\circ$ hacia el frente con un rango desde 1,2m a 3,5 m. tal como se muestra en la *Figura 33*.



Figura 33. Campo de visión frontal horizontal del sensor Kinect.

En su primer diseño de la plataforma de interiores, el sensor Kinect fue utilizado para realizar el mapeo de entornos.

- **Anillo de Sonares:** el conjunto de sonares dentro de un robot proporcionan un campo de profundidad haciendo que el robot pueda conocer los obstáculos en el entorno. Para la utilización de los mismos depende mucho de la correcta distribución que tengan en el robot.

La plataforma robótica móvil para interiores en su primer diseño cuenta con un conjunto de sensores sonares como se muestra en la *Figura 34*.

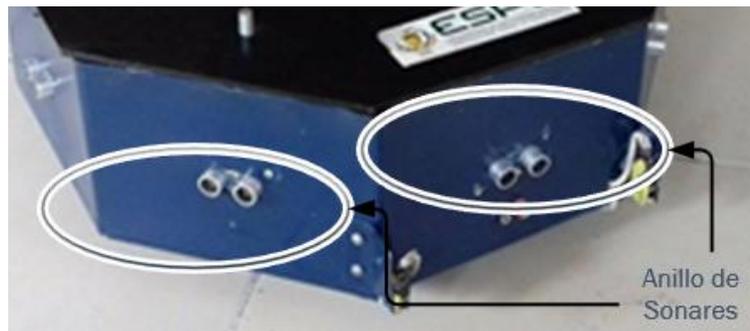


Figura 34. Anillo de sonares en primer diseño de la plataforma robótica móvil.

Los sensores de ultrasonido son usados para realizar mapeo del entorno, aunque presentan varios errores, en la alternativa se plantea realizar el mapeo aumentando la cantidad de sensores evitando tener ángulos ciegos.

- **Sensor Lidar Lineal:** es un sensor de distancia con un alcance de 40m de profundidad, esto lo logra por su alta frecuencia de muestreo lo que permite que posea una resolución de 1cm. En la *Figura 35* se puede observar el alcance del sensor lidar lineal.

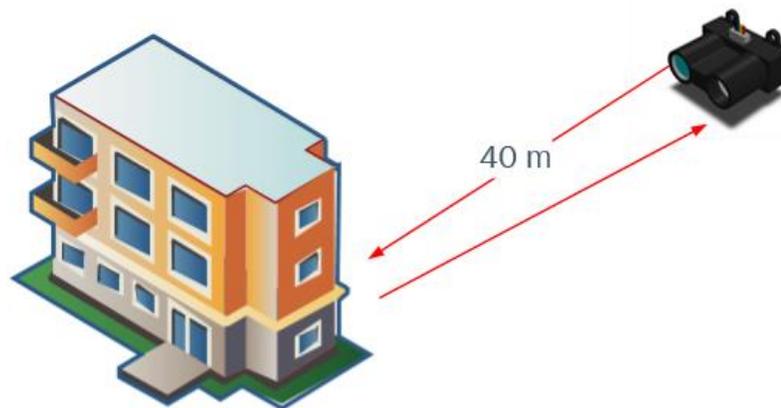


Figura 35. Distancia de detección del laser del sensor lidar lineal.

Como alternativa de solución se plantea usar el sensor lidar incluyendo el diseño de un mecanismo de giro permitiendo que el sensor pueda mapear en a 360°.

- **Sensor Lidar Omnidireccional 360°:** Al igual que el lidar lineal, el sensor Lidar de 360° funciona con el envío y recepción de rayos laser, donde su frecuencia de muestreo es mayor que el lidar lineal. Al ser omnidireccional posee ya un mecanismo de giro para mapear en 360° y tiene alcance de 6m. En la *Figura 36* se muestra a percepción y alcance del sensor.

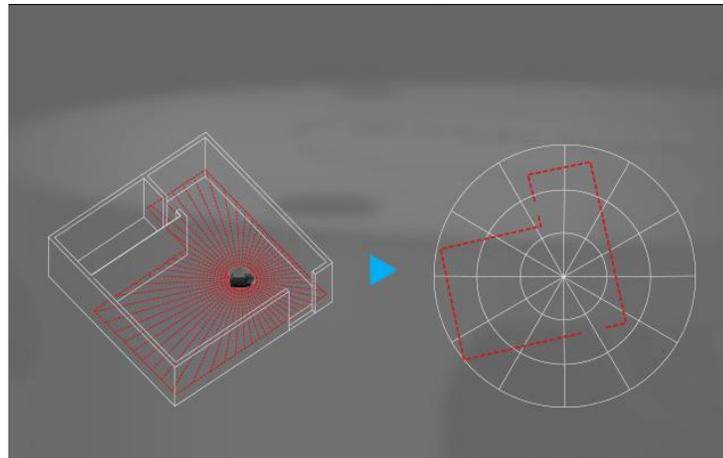


Figura 36. Radio de alcance del lidar Omnidireccional 360°.

Fuente: (SLAMTEC, s.f.).

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del diseño para la obtención del concepto final. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 16 hasta la Tabla 19.

Tabla 16*Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 3.*

COSTO	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\sum +1$	PRIORIDA D
ALTERNATIV A 1		0	2,5	5	8,5	25%
ALTERNATIV A 2	5		5	5	16	47%
ALTERNATIV A 3	2,5	0		5	8,5	25%
ALTERNATIV A 4	0	0	0		1	3%
SUMATORIA					34	100%

Tabla 17*Ponderación de coste computacional para las alternativas de diseño del subsistema 3.*

COSTE COMPUTACION AL	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\sum +1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		0	0	0	1	2%
ALTERNATIVA 2	5		5	5	16	36%
ALTERNATIVA 3	5	5		2,5	13,5	31%
ALTERNATIVA 4	5	5	2,5		13,5	31%
SUMATORIA					44	100%

Tabla 18*Ponderación de ángulo de visión para las alternativas de diseño del subsistema 3.*

ÁNGULO DE VISIÓN	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\sum +1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		0	2,5	0	3,5	10%
ALTERNATIVA 2	5		5	0	11	32%
ALTERNATIVA 3	2,5	0		0	3,5	10%
ALTERNATIVA 4	5	5	5		16	47%
SUMATORIA					34	100%

Tabla 19*Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 3.*

IMPLEMENTACI ÓN	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\sum +1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		5	2,5	0	8,5	25%
ALTERNATIVA 2	0		2,5	0	3,5	10%
ALTERNATIVA 3	2,5	2,5		0	6	18%
ALTERNATIVA 4	5	5	5		16	47%
SUMATORIA					34	100%

En la Tabla 20 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final al igual que su respectivo diseño.

Tabla 20

Ponderación de localización y mapeo de la plataforma móvil con las alternativas de diseño al subsistema 3.

	COSTO	COSTE COMPUTACIONAL	ÁNGULO DE VISIÓN	IMPLEMENTACIÓN	ξ total	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,063	0,002	0,033	0,081	0,179	18%
ALTERNATIVA 2	0,118	0,037	0,105	0,033	0,293	29%
ALTERNATIVA 3	0,063	0,032	0,033	0,057	0,184	18%
ALTERNATIVA 4	0,007	0,032	0,152	0,152	0,343	34%

La alternativa ganadora es la alternativa 4: instalación de un Lidar omnidireccional 360° con un alcance de 6 metros.

3.4.4. Subsistema 4: Navegación reactiva

Dentro del mapeo de entornos una de las funciones primordiales para sobre guardar la integridad física del robot es la navegación reactiva. La función principal que tendrá el robot es detenerse ante la detección de obstáculos.

Se toma en cuenta cada uno de los panoramas posibles para evaluar los principales factores que hacen posible el funcionamiento óptimo del subsistema. En la Tabla 21 se realiza la ponderación de los 4 factores principales dentro del subsistema 4. Los factores para análisis son:

- Costo
- Coste Computacional

- Angulo de Visión
- Implementación

Se evalúa los mismos factores del subsistema 3 debido a que ambos subsistemas son complementarios en su funcionamiento por lo que es primordial evaluar en ambos subsistemas los mismos factores.

Tabla 21

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 4.

CRITERIO	COSTO	COSTE COMPUTACIONAL	ÁNGULO DE VISIÓN	IMPLEMENTACIÓN	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
COSTO		5	0	2,5	8,5	25%
COSTE COMPUTACIONAL	0		2,5	0	3,5	10%
ÁNGULO DE VISIÓN	5	2,5		2,5	11	32%
IMPLEMENTACIÓN	2,5	5	2,5		11	32%
Sumatoria Total					34	100%

Obtenidas las ponderaciones de asignación de uno de los factores se presenta a continuación las alternativas de solución al subsistema de navegación reactiva.

Se puede observar 4 opciones que se pretenden evaluar para el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil para interiores dentro del subsistema 4. Las alternativas a evaluar para subsistema 4 son:

- **Sensor Kinect:** por sus características mencionadas se toma como una alternativa a evaluación para el funcionamiento de navegación reactiva.
- **Anillo de Sonares:** Con la correcta distribución y por su diseño para sensado de distancia es evaluado nuevamente para en subsistema de navegación reactiva.

- **Sensor Lidar Lineal:** Al tener un gran alcance es posible detectar obstáculos a una mayor distancia.
- **Cámara monocular:** En el subsistema de navegación reactiva un método para la detección de obstáculos es el procesamiento de imágenes con las cuales se puede obtener la percepción del entorno. En la *Figura 37* se puede observar un ejemplo de una cámara monocular.



Figura 37. Cámara Monocular.

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del diseño para la obtención del concepto final. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 22 hasta la Tabla 25.

Tabla 22

Ponderación de costo para las alternativas de diseño del subsistema 4.

COSTO	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		0	2,5	0	3,5	10%
ALTERNATIVA 2	5		5	5	16	47%
ALTERNATIVA 3	2,5	0		0	3,5	10%
ALTERNATIVA 4	5	0	5		11	32%
				SUMATORIA	34	100%

Tabla 23

Ponderación de coste computacional para las alternativas de diseño del subsistema 4.

COSTE COMPUTACIONAL	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\xi + 1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		0	0	0	1	3%
ALTERNATIVA 2	5		5	5	16	41%
ALTERNATIVA 3	5	5		0	11	28%
ALTERNATIVA 4	5	0	5		11	28%
SUMATORIA					39	100%

Tabla 24

Ponderación de ángulo de visión para las alternativas de diseño del subsistema 4.

ÁNGULO DE VISIÓN	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\xi + 1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		0	2,5	2,5	6	18%
ALTERNATIVA 2	5		5	5	16	47%
ALTERNATIVA 3	2,5	0		2,5	6	18%
ALTERNATIVA 4	2,5	0	2,5		6	18%
SUMATORIA					34	100%

Tabla 25

Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 4.

IMPLEMENTACIÓN	ALTERNATIV A 1	ALTERNATIV A 2	ALTERNATIV A 3	ALTERNATIV A 4	$\xi + 1$	PRIORIDA D
ALTERNATIVA 1		5	2,5	2,5	11	32%
ALTERNATIVA 2	0		2,5	0	3,5	10%
ALTERNATIVA 3	2,5	2,5		2,5	8,5	25%
ALTERNATIVA 4	2,5	5	2,5		11	32%
SUMATORIA					34	100%

En la Tabla 26 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final al igual que su respectivo diseño.

Tabla 26

Ponderación de sistemas para navegación reactiva de la plataforma móvil con las alternativas de diseño del subsistema 4.

	COSTO	COSTE COMPUTACIONAL	ÁNGULO DE VISIÓN	IMPLEMENTACIÓN	ξ total	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,026	0,003	0,057	0,105	0,190	19%
ALTERNATIVA 2	0,118	0,042	0,152	0,033	0,345	35%
ALTERNATIVA 3	0,026	0,029	0,057	0,081	0,193	19%
ALTERNATIVA 4	0,081	0,029	0,057	0,105	0,272	27%

La alternativa ganadora es la alternativa 2: instalación de un anillo de sonares en una distribución circular para acoplar a la nueva forma de la plataforma de interiores.

3.4.5. Subsistema 5: Planificación de trayectoria

En las capacidades del robot para el presente proyecto es el traslado de un punto a otro dentro de un plano conocido, a este desplazamiento lo denominamos planificación de trayectoria.

Existen varios métodos que permiten generar trayectorias generando posiciones de tal manera que el robot se pueda mover al lugar indicado por medio de lugares donde no encuentre obstáculos.

Para la generación de trayectoria se hará uso tanto de la localización y mapeo como también de la navegación reactiva.

3.4.6. Subsistema 6: Estación de Carga y energía

Para la solución del problema energético de la plataforma el subsistema 6 lo solventa mediante una estación de carga para lo cual se debe evaluar la forma de posicionamiento del robot a su respectiva estación. En la Tabla 27 se realiza la ponderación de los 4 factores principales dentro del subsistema 4. Los factores para análisis son:

- Implementación
- Precisión
- Confiabilidad

Tabla 27

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 6.

CRITERIO	IMPLEMENTACIÓ N	PRECISIO N	CONFIABILIDA D	$\xi +1$	PONDERACIÓ N
IMPLEMENTACIÓ N		0	2,5		22%
PRECISION	5		2,5		53%
CONFIABILIDAD	2,5	0,5			25%
	Sumatoria Total			16	100%

Obtenidas las ponderaciones de asignación de cada uno de los factores se presenta a continuación las alternativas de solución al subsistema de navegación reactiva.

Se puede observar 4 opciones que se pretenden evaluar para el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil para interiores dentro del subsistema 4. Las alternativas a evaluar para subsistema 4 son:

- **Sensores Infrarrojos (Emisor -Receptor):** una alternativa posicionar el robot en la estación de carga es el uso de sensores infrarrojos. Se propone implementar emisores en la estación de carga y receptores en la plataforma móvil o viceversa. En función de las señales obtenidas se puede estimar la posición del robot.
- **Puntos de Referencia:** Con el uso de puntos o balizas de referenciase puede estimar la posición del robot, en su funcionamiento se debe tomar en cuenta los posibles errores que se pueden generar por efecto del entorno donde se encuentre trabajando el robot.

- **Odometría:** dentro de la localización del robot móvil uno de los aspectos importantes es su odometría con el cual se puede estimar la posición del robot, con la odometría se podría conocer el punto inicial (estación de carga) y así regresar luego de cualquier desplazamiento, aunque se debe tomar muy en cuenta los errores acumulativos.

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del diseño para la obtención del concepto final. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 28 hasta la Tabla 30.

Tabla 28

Ponderación de implementación para las alternativas de diseño del subsistema 6.

IMPLEMENTACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	2,5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	0		2,5	3,5	19%
ALTERNATIVA 3	2,5	2,5		6	33%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 29

Ponderación de precisión para las alternativas de diseño del subsistema 6.

PRECISIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	2,5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	0		5	6	33%
ALTERNATIVA 3	2,5	0		3,5	19%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 30

Ponderación de confiabilidad para las alternativas de diseño del subsistema 6.

CONFIABILIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	2,5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	0		0	1	6%
ALTERNATIVA 3	2,5	5		8,5	47%
SUMATORIA				18	100%

En la Tabla 31 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final al igual que su respectivo diseño.

Tabla 31

Ponderación de sistemas para la estación de carga de la plataforma móvil con las alternativas de diseño del subsistema 6.

	IMPLEMENTACIÓN	PRECISION	CONFIABILIDAD	ξ total	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1	0,103	0,251	0,118	0,472	47%
ALTERNATIVA 2	0,043	0,177	0,014	0,234	23%
ALTERNATIVA 3	0,073	0,103	0,118	0,294	29%

La alternativa ganadora es la alternativa 1: instalación de sensores infrarrojos tanto emisores como receptores en la plataforma robótica móvil para de interiores y su estación de carga.

3.5. Concepto final

Una vez realizada la evaluación y selección de alternativas se puede describir el concepto final. Para realizar el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil para interiores se toman cada una de las alternativas escogidas y se dispone a reunir cada una de ellas mediante la solución de 4 módulos que compondrán a robot para formar el presente trabajo.

Los módulos especificados requieren una interacción mediante un controlador principal, uno de los objetivos del proyecto es la utilización del framework ROS (Robot Operating System) el cual tiene que ser montado en un computador de sistema operativo basado en Debian.

La autonomía del robot es un objetivo a cumplir en el proyecto, por lo que es esencial la utilización de una computadora a bordo que cumpla con las siguientes características:

- Tamaño reducido (alojada en el interior del robot móvil).
- Conectividad a Red Inalámbrica Wifi.
- Alta capacidad de procesamiento.
- Bajo costo.

En la Tabla 32 se realiza la ponderación de los 4 factores principales para la selección del computador de la plataforma robótica móvil.

Tabla 32

Ponderación de criterios de evaluación para el computador.

CRITERIO	TAMAÑO	CONECTIVIDAD	PROCESAMIENTO	COSTO	$\sum +1$	PONDERACIÓN
TAMAÑO		2,5	2,5	0	6	18%
CONECTIVIDAD	2,5		2,5	0	6	18%
PROCESAMIENTO	2,5	2,5		2,5	8,5	25%
COSTO	5	5	2,5		13,5	40%
Sumatoria Total					34	100%

Las alternativas de selección para el controlador son:

- **Jetson TK1:** Computador Quad Core ARM Cortex, 2Gb de memoria Ram, puertos USB, i2c, HDMI, ethernet, serie RS232, PCI, SATA, GPIO. Tamaño: 127 x 127mm, Precio: \$190 (USA)
- **INTEL NUC i3:** Computador Intel Core i3, 6Gb Ram, 6 puertos USB, infrarrojo, Wifi, Ethernet, 65W consumo, 12-19V alimentación, Tamaño: 101 x 101 mm. Precio: \$265 (USA).

- **Raspberry PI 2:** Computador Quad Core 1,2GHz ARM v8, 1Gb Ram, 4 puertos USB, HDMI, memoria MicroSD, Ethernet, Wifi, GPIO, i2c, uart, SPI, 4W consumo. Precio: \$55 (ECU)

Se realiza la evaluación de cada una de las alternativas con los factores considerados para evaluación y selección del computador que estará a cargo de la plataforma robótica móvil. Cada una de las ponderaciones se puede observar a partir de la Tabla 33 hasta la

Tabla 36.

Tabla 33

Ponderación de tamaño para las alternativas del computador de la plataforma robótica móvil.

TAMAÑO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\Sigma +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		5	2,5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	0		0	1	6%
ALTERNATIVA 3	2,5	5		8,5	47%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 34

Ponderación de conectividad para las alternativas del computador de la plataforma robótica móvil.

CONECTIVIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\Sigma +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	2,5		5	8,5	47%
ALTERNATIVA 3	0	0		1	6%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 35

Ponderación de procesamiento para las alternativas del computador de la plataforma robótica móvil.

PROCESAMIENTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\Sigma +1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	5	8,5	47%
ALTERNATIVA 2	2,5		2,5	6	33%
ALTERNATIVA 3	0	2,5		3,5	19%
SUMATORIA				18	100%

Tabla 36

Ponderación de costo para las alternativas del computador de la plataforma robótica móvil.

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\xi + 1$	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1		2,5	0	3,5	19%
ALTERNATIVA 2	2,5		0	3,5	19%
ALTERNATIVA 3	5	5		11	61%
			SUMATORIA	18	100%

En la Tabla 37 se muestra la ponderación total en la cual se puede observar el resultado final de la elección de la mejor alternativa para realizar el concepto final al igual que su respectivo diseño.

Tabla 37

Ponderación de alternativas para la selección de computador de la plataforma robótica móvil.

	TAMAÑO	CONECTIVIDA D	PROCESAMIENT O	COSTO	ξ total	PONDERACIÓ N
ALTERNATIVA 1	0,083	0,083	0,118	0,077	0,362	36%
ALTERNATIVA 2	0,010	0,083	0,083	0,077	0,254	25%
ALTERNATIVA 3	0,083	0,010	0,049	0,243	0,384	38%

La alternativa ganadora es la alternativa 3: uso de una computadora Raspberry Pi 2 para la plataforma robótica móvil.

Realizada la selección completa para la plataforma robótica móvil se estructuran los subsistemas de manera que se pueda tener a la plataforma robótica móvil en forma modular

En la Tabla 38 se puede observar la distribución de los subsistemas que conforman al robot. En cada uno de los módulos se tendrá el diseño tanto en su parte mecánica, electrónica y parte de control. Se detallará cada uno de los módulos como estarán interactuando entre cada uno.

La plataforma robótica móvil contará con un módulo adicional que será exclusivo para soportar carga sobre él, así servir para transporte de diferentes elementos dentro del trabajo que se implemente.

3.6. Módulo de Estructura

El módulo de Estructura será toda la base, la cual acogerá a los elementos principales de locomoción como son las llantas con sus respectivos motores y la rueda loca. En el módulo de estructura se tendrá además el procesamiento principal de todo el robot.

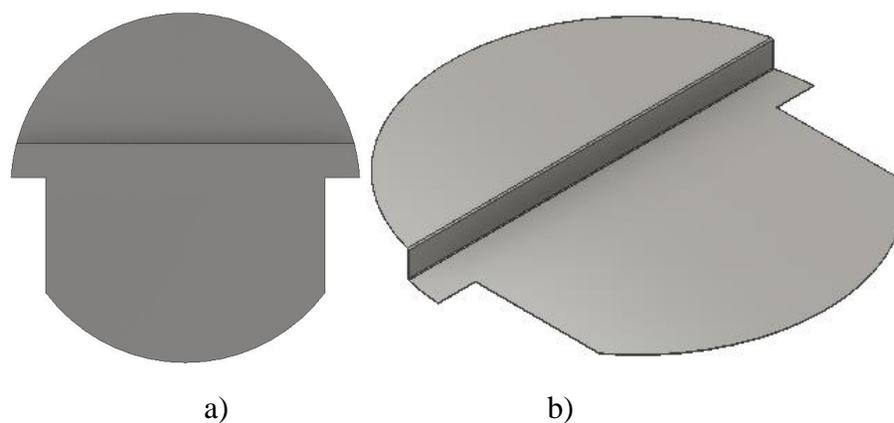
3.6.1. Diseño Mecánico

El diseño parte de una forma seleccionada la cual es de forma circular, dentro de ello se debe tomar en cuenta el posicionamiento de las llantas y la rueda loca de tal manera que se encuentren sobre un mismo plano.

En la *Figura 38* se muestra el diseño de la base del robot tanto en su vista superior como vista isométrica.

Tabla 38*Módulos de la Plataforma Robótica móvil para interiores.*

Módulo	Subsistema	Solución
Estructura	Estructura y Soporte	Base y estructura circular con un diámetro de 400mm
	Locomoción	El nuevo sistema tiene una transmisión de dos llantas principales y rueda loca
Sensores	Localización y Mapeo	Para la generación de SLAM se contará con un Rplidar omnidireccional 360°
	Navegación Reactiva	La detección de obstáculos estará a cargo de anillo de sonares en distribución circular
	Planificación de Trayectoria	Con la unión del sensor Lidar para obtener el mapa del entorno y el anillo de sonares para detectar obstáculos se puede generar trayectorias y posicionar el robot en diferentes puntos del plano.
Estación de Carga	Estación de Carga	Se realizará la estación para cargar las baterías que estarán alojadas en la estructura, mientras que la posición y orientación en la estación de carga será posible por medio de sensores infrarrojos: emisores en la estación de carga y los receptores en el robot.

**Figura 38.** Base circular de la plataforma móvil para interiores**Nota:** a) Vista Superior b) ista isométrica

Dentro de la base se debe tener en cuenta la distribución de los elementos electrónicos, por lo que se debe considerar su peso y realizar un análisis de esfuerzos.

3.6.1.1. Análisis de Esfuerzos Placa Base del Robot móvil

Para el análisis de esfuerzos sobre la placa base del robot móvil se debe tomar en cuenta todos los elementos que ejercen presión sobre la placa por efecto de su peso. En la Tabla 39 se muestra las consideraciones a tomar para el análisis de la placa.

Tabla 39

Consideraciones de cargas para el análisis en la palca base del robot.

Cantidad	Descripción	Peso unitario (kg)
2	Motor a pasos Nema 23	1,7
2	Baterías 7AH	2
2	Drivers motores	0,2
1	Placa electrónica	0,2

Adicionalmente se añade el peso de los elementos superiores al robot, como son el módulo de sensores, el cual consta del anillo de sonares y el sensor Lidar, junto con el aditamento de carga superior. Los cálculos se inician con el análisis de las ruedas del robot. Los motores a utilizar son motores paso a paso NEMA23 con un torque de 3Nm.

El análisis inicia generando el diagrama de cuerpo libre sobre una rueda, en la *Figura 39* se puede observar el diagrama de cuerpo libre a utilizar para el análisis.

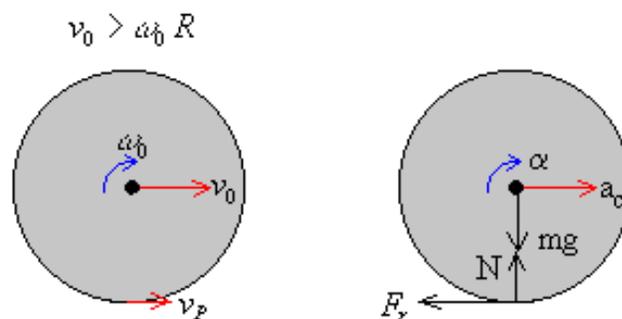


Figura 39. Diagrama de cuerpo libre de rueda en un plano.

La rueda tiene sus fuerzas ejercidas en la flecha de acople con los motores, con la fuerza de rozamiento que ejerce el piso:

$$\alpha = 0 \quad (14)$$

Se analizará en un caso estático, calculando al peso máximo (mg) que se puede mover con el torque de los motores, (14), (17).

$$\sum T = 0 \quad (15)$$

$$Fr \times r = T_{motor} \quad (16)$$

$$\mu \frac{m}{2} g \times r = 3 Nm \quad (17)$$

Con un coeficiente estático aproximadamente de 0,5 para rueda de goma sobre concreto liso.

$$m = 21 Kg \quad (18)$$

Por efecto del análisis se concluye que con el análisis estático se puede mover una masa total de 21 Kg (18). El peso máximo del robot móvil será de 15 Kg para no forzar los motores a pasos al máximo y no hacer uso de la energía de las baterías bruscamente. Teniendo como resultado lo siguiente:

- Masa total de componentes mecánicos y electrónicos del robot móvil = 10 Kg
- Carga Neta robot = 5 Kg

3.6.1.2. Análisis CAE

Se realiza el análisis cae aplicando fuerzas sobre la placa base del robot la cual estará con todos los elementos sobre ella, en la Tabla 40 se muestra las propiedades del material a usar para el análisis CAE.

Tabla 40*Propiedades del Material de la placa Base.*

Material	Acero Galvanizado
Espesor	1.1mm
Sy	330MPa
Sut	310MPa

Una vez realizado el análisis, se pueden observar los resultados como se muestra en la Figura 40.

Los esfuerzos principales Von Mises en la placa tienen como máximo 10MPa en las áreas de color rojo, nunca llegando a superar el límite de resistencia a la fluencia del material dado.

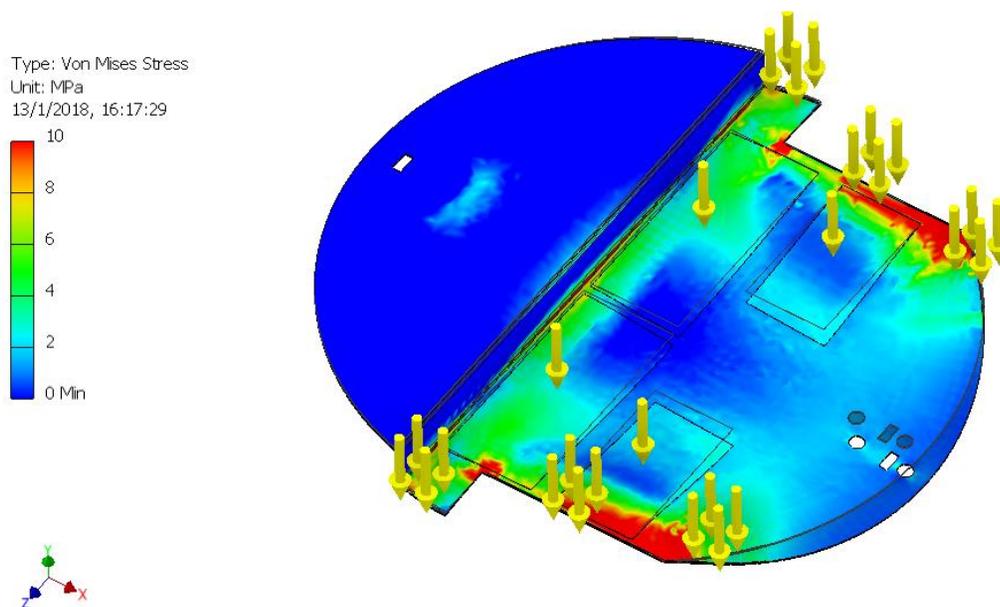


Figura 40. Análisis CAE con cargas estáticas en placa base de robot móvil.

La placa metálica con estas características llega a alcanzar un factor de seguridad de 15 justificado por la dificultad de ensamblar una placa metálica de menor calibre.

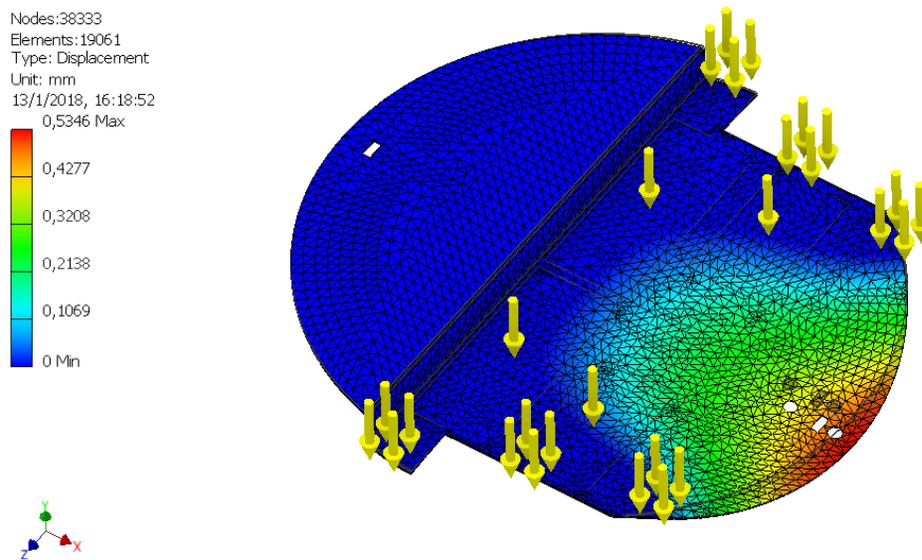


Figura 41. Deflexión en la placa base de la estructura del robot móvil.

La Figura 41. Muestra el desplazamiento de la placa debido a las cargas. El desplazamiento tiene como máximo 0,53 mm gracias al material empleado.

3.6.1.3. Contorno y Estructura

Se realiza el diseño final de la estructura, tomando en cuenta el posicionamiento de las llantas, rueda loca y guardachoques del robot. Se realiza el respectivo diseño del contorno que cubrirá al robot. Para ellos se utilizará el mismo material del cual se realizará la placa base.

En la *Figura 42* se puede observar el diseño final del contorno de la plataforma robótica móvil el cuál será acoplado a la placa base por medio del proceso de soldadura.

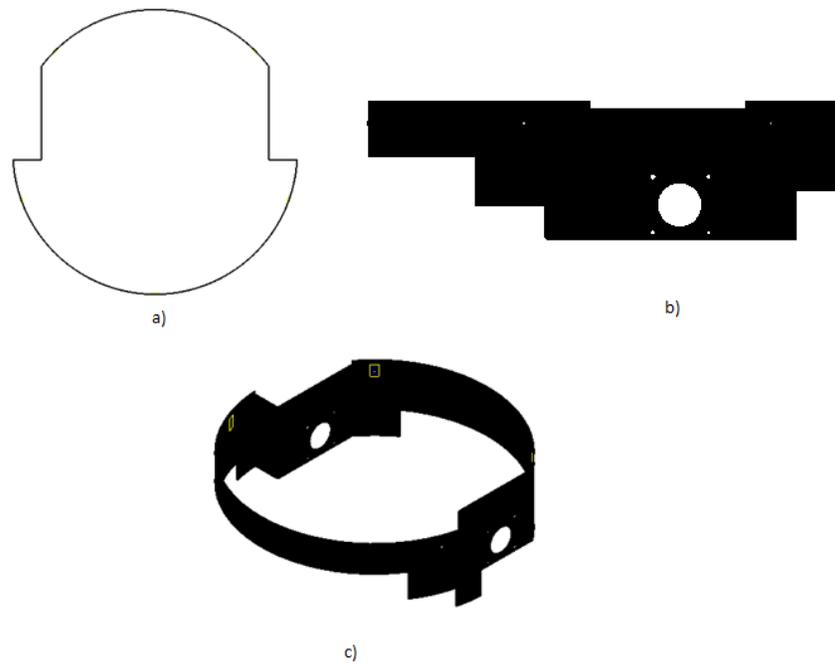


Figura 42. Contorno de la plataforma robótica móvil.
Nota: a) Vista Superior b) Vista Lateral c) Vista isométrica.

En la figura 40 se puede observar la distribución de cada uno de los espacios para los elementos del robot. Se muestra el espacio tanto para el acople de la llanta derecha e izquierda cada uno con sus respectivos motores, los guardachoques (Bumpers) frontal y trasero.

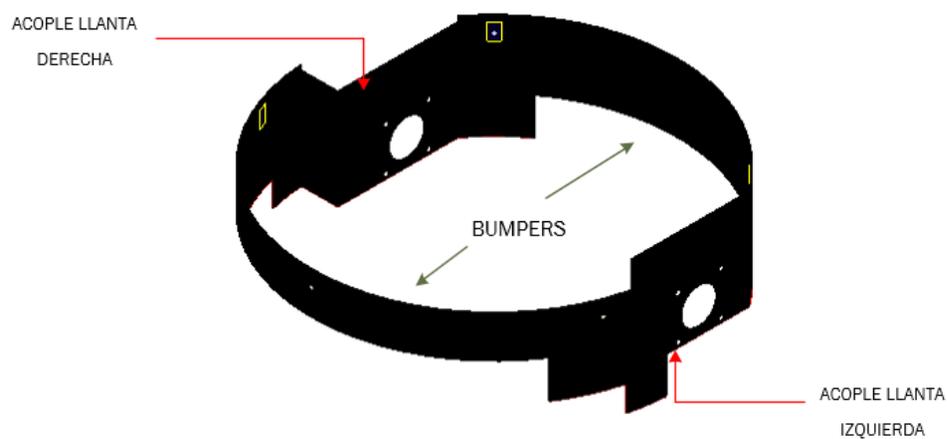


Figura 43. Disposición de los elementos del Robot.

3.6.1.4. Bumpers

Para sobre guardar la integridad física del robot ante posibles colisiones se incluirá en el robot dos guarda-choques. En la *Figura 44 a)* se puede observar el bumper trasero del robot y en la *Figura 44 b)* se puede observar el bumper frontal el cual es de mayor dimensión.



Figura 44. Bumpers del robot. Bumper Trasero y Bumper Frontal

Para el acople de cada uno de los bumpers se tiene topes de resorte, lo cual hará que tengan movimiento retráctil en caso de colisiones.

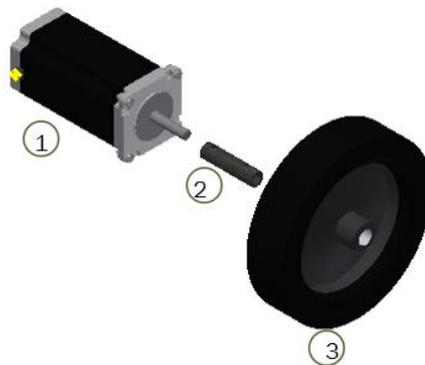
3.6.1.5. Acople de Tracción

Para implementar la tracción del robot se tendrán dos llantas acopladas al contorno del robot. El sistema completo de tracción se compone de 3 elementos los cuales generarán la movilidad de la plataforma robótica móvil.

En la *Figura 90* se muestra el sistema de tracción que estará en llanta derecha y la llanta izquierda. Cada elemento del sistema se puede observar en la Tabla 41, serán implementados en cada lado de la plataforma robótica.

Tabla 41*Elementos del Sistema de Tracción de la plataforma móvil.*

Número	Elemento
1	Motor
2	Eje de Acople
3	Llanta

**Figura 45.** Sistema de tracción del robot.

Dentro del sistema de tracción se encuentra también la rueda que ayudará en el soporte del robot como un tercer apoyo, en la *Figura 46* se puede observar la rueda a utilizar en la plataforma, la cual tiene una capacidad de carga máxima de 30kg

**Figura 46.** Rueda loca del sistema diferencial del robot.

3.6.1.6. Acople de carga

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es que el robot pueda cargar sus baterías de manera independiente. Para lograr la carga de las baterías se requiere puntos de conexión o pines que en su diseño se debe tomar en cuenta el material con características de alta conductividad eléctrica.

Uno de los materiales más conductivos es el Cobre, dentro de la plataforma móvil se utilizará una aleación de Cobre y Zinc con alta conductividad eléctrica como es el Bronce dulce. Se diseñará dos pines que tendrán conexión con la estación de carga y a la vez con las baterías. En la *Figura 47* se puede observar los pines de carga a realizar e implementar en la placa base.

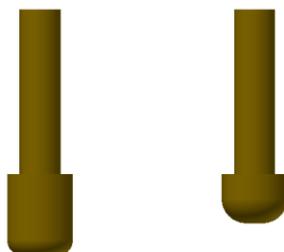


Figura 47. Pines de Carga de la plataforma robótica móvil.

En la *Figura 48* se puede observar la colocación de los pines de carga en la parte trasera del robot el cual hará el acople con la estación de carga y se dará energía a la plataforma robótica móvil.

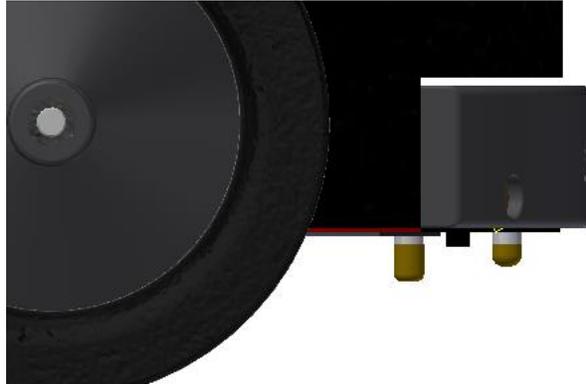


Figura 48. Pines de Carga en la placa base del robot.

3.6.1.7. Soporte de Receptores Infrarrojos

Para cumplir uno de los requerimientos de la autonomía de la plataforma y dada la selección de alternativas para el posicionamiento del robot en su estación de carga se tendrá el uso de sensores infrarrojos emisores y receptores. En el robot se ubicarán los receptores infrarrojos.

Se diseñarán los soportes para la ubicación de los sensores infrarrojos de tal manera que se puedan colocar en el contorno de la plataforma robótica móvil. En la *Figura 49* se puede observar el diseño CAD de los soportes para los receptores infrarrojos que se ubicarán en el robot.

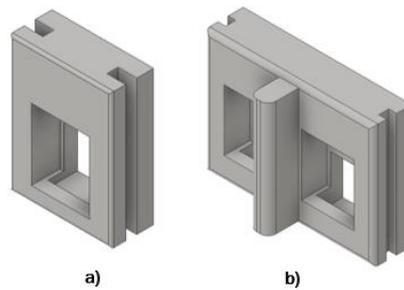


Figura 49. Soporte de sensores infrarrojos.

Nota: a) Soporte Simple izquierdo y derecho b) Soporte Doble Central.

3.6.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico que corresponde a la plataforma robótica móvil constituye en el control, sensores, actuadores y procesamiento principal del robot. El robot consta de una computadora Raspberry Pi2 que permitirá el control de toda la plataforma móvil.

3.6.2.1. Energía

La plataforma robótica móvil se sustentará energéticamente con dos baterías de plomo-ácido con lo que cubrirá toda la demanda de energía del robot. En la Tabla 42 se muestra las características de cada batería.

Tabla 42

Características independientes de cada batería.

Características	Magnitud
Voltaje	12 [V]
Capacidad de Corriente	7 [Ah]
Duración de Ciclo	20 [h]

La plataforma robótica móvil al contar con dos baterías tendrá las características mostradas en la Tabla 43 muestra las características totales de la plataforma robótica móvil.

Tabla 43

Características energéticas de la plataforma robótica móvil.

Características	Magnitud
Voltaje	24 [V]
Capacidad de Corriente	7 [Ah]

3.6.2.2. Sensor de Giroscopio

Para el funcionamiento del robot se requiere del conocimiento de posición y orientación. El sensor giroscopio complementa al robot en su función de odometría, específicamente en obtener la posición angular respecto al eje Z, o su posición en *yaw*.

Para el correcto funcionamiento del sensor se debe implementar en el centro de giro del robot, conforme a su configuración diferencial, es decir, en la posición que se muestra en la *Figura 50*.

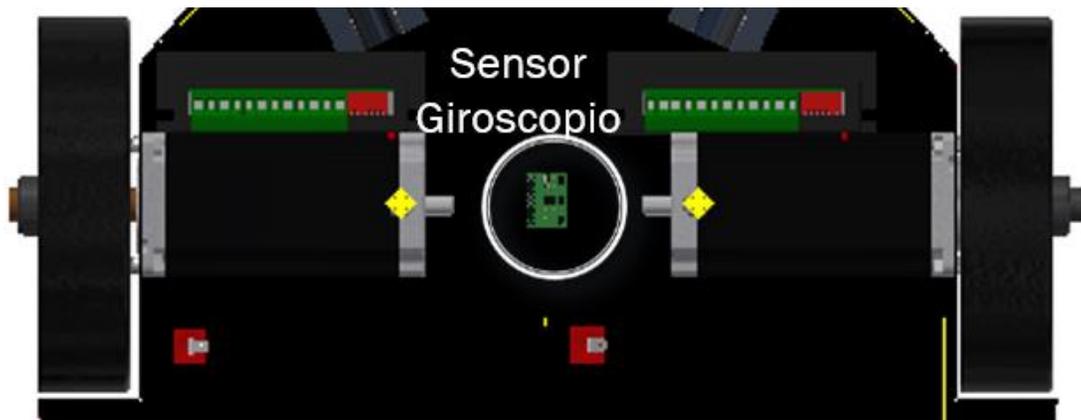


Figura 50. Ubicación del sensor giroscopio.

El sensor disponible en el mercado, que será utilizado es una unidad de medición inercial IMU, del modelo MPU6050, con puerto i2c de comunicación. Cuenta con 6 grados de libertad: aceleración en 3 ejes (x, y, z), y giroscopios para los mismos ejes.

3.6.2.3. Sensores Fines de Carrera

Los sensores fines de carrera cumplirán la función de detección de colisiones, esto es posible gracias a la distribución que tienen a lo largo de los bumpers tanto frontal como trasero. En la *Figura 51* se puede observar la distribución de los fines de carrera en el bumper frontal de la plataforma robótica.

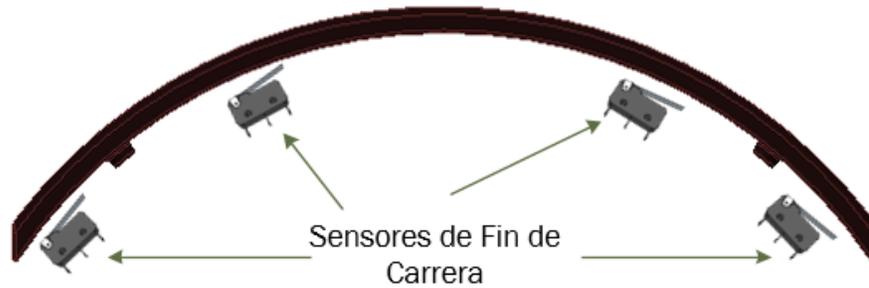


Figura 51. Distribución Fines de Carrera.

La distribución de los fines de carrera estará en cada uno de los bumpers tanto frontal como trasero, permitiendo que al momento que uno de ellos se active el robot se detendrá automáticamente.

3.6.2.4. Receptores Infrarrojos

Los receptores infrarrojos serán capaces de recibir las señales que será enviada por los emisores infrarrojos dando la señal de posicionamiento a la estación de carga. Se colocarán 4 sensores infrarrojos AX-1838HS posicionados de tal manera que se pueda obtener un posicionamiento correcto en la estación de carga.

Para el funcionamiento correcto se hará uso de un receptor infrarrojo encapsulado, permitiendo una amplificación de la señal de recepción, en la *Figura 52* se puede observar el receptor infrarrojo encapsulado a utilizar en la plataforma robótica móvil.

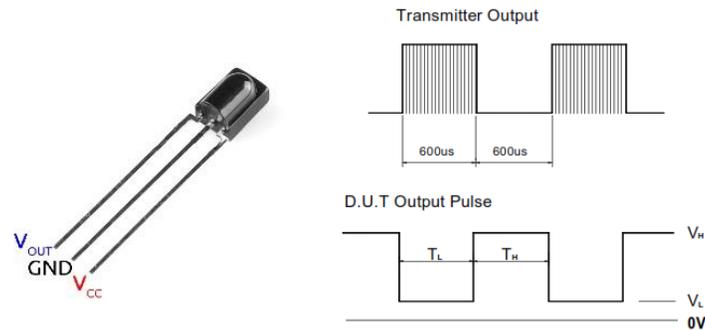


Figura 52. Receptor infrarrojo encapsulado AX-1838HS.

El dispositivo está diseñado para trabajar con una frecuencia de la señal portadora de 38 KHz.

La señal modulada se interpreta en el mismo receptor generando un valor lógico de 0V mientras recibe la señal, como lo muestra la *Figura 52*.

3.6.2.5. Sensores Sharp

Los sensores Sharp son sensores de distancia que en la plataforma móvil harán posible que el robot pueda detectar discontinuidad en la superficie donde estará trabajando. En la *Figura 53* se puede observar el posicionamiento de los sensores Sharp en la plataforma robótica.

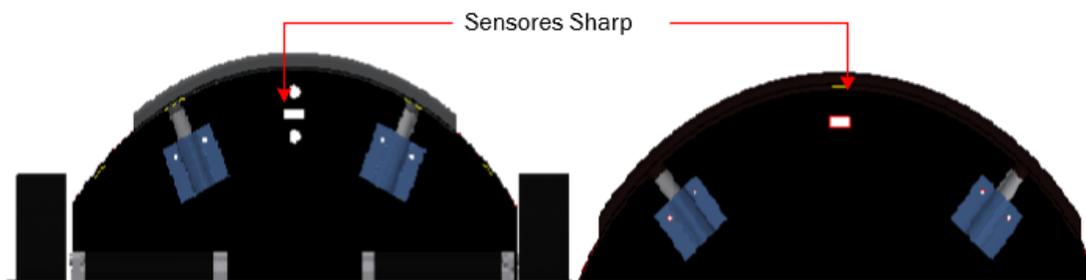


Figura 53. Posicionamiento de los sensores Sharp.

La finalidad de cada uno de los sensores Sharp es detectar si el robot se encuentra en una grada en la cual el robot tendrá que precautelar su integridad física. En la

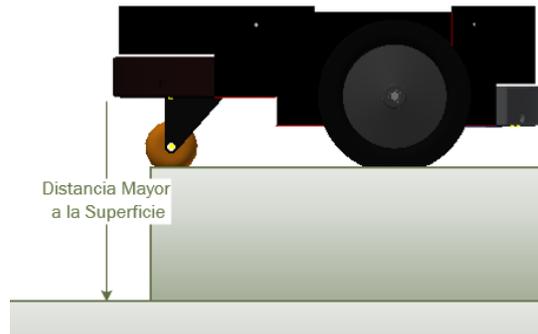


Figura 54. Funcionamiento de los sensores Sharp.

En la *Figura 54* se puede observar como es el funcionamiento de los sensores Sharp haciendo que el robot se detenga ante un eminente peligro, la señal de cada uno de ellos será enviada a la tarjeta principal que será encargada de enviar las órdenes a los actuadores.

3.6.2.6. Drivers Motores a pasos

Para el control de los motores pasos se utilizará los drivers Tb6600 que permitirán el control sobre los actuadores. En la *Figura 55* se muestra el controlador a usar en la plataforma, las características del controlador se muestran en la Tabla 44.



Figura 55. Controlador de motor a pasos.

Tabla 44*Características del controlador de motora pasos.*

Características	Magnitud
Voltaje	18 - 50[V]
Capacidad de Corriente	5 [A]
Motores	2-4 Fases

3.6.2.7. Adquisición y procesamiento de datos

Una de las partes más importantes dentro de la plataforma robótica es la que está encargada de la adquisición y procesamiento de datos. Dentro de los antecedentes se tiene que la placa encargada de toda la adquisición y procesamiento son dos placas Arduino Mega 2560.

En el nuevo diseño de la plataforma robótica móvil se tendrá el uso de un computador a bordo para cumplir con la autonomía en el control de actuadores y recepción de datos, por ello se utilizará una Raspberry Pi 2 model B como resultado de la selección.

La computadora también estará a cargo del control de los motores, sensores y dispositivos indicadores como luces de la plataforma robótica móvil. Gracias a la conexión ethernet y conexión Wifi se tendrá una comunicación en modo maestro – esclavo con un computador de estación fija gracias a la compatibilidad del sistema operativo ROS. En la Tabla 45 se puede observar todas las características de la tarjeta que será la encargada de la adquisición y procesamiento de datos de la plataforma robótica.

Tabla 45
Características del minicomputador Raspberry Pi 2.

Raspberry Pi 2 Modelo B	
Procesador Principal	Broadcom 900 MHz ARMv7 Quad Core
RAM	1 GB DDR2
Procesador Gráfico	Video Core IV 3D graphics core
Puertos USB	4 puertos USB 2.0 hasta 1,2 A
Periféricos de bajo nivel	40 pines GPIO, UART, I2C, SPI, +3,3V, +5V, GND, Wifi b/g/n en la banda de 2.4GHz, Bluetooth
Multimedia	HDMI, audio vía conector 3,5mm, video Raw LCD (DSI)
Almacenamiento	Micro SD
Conectividad	10/100 Ethernet (RJ45)
Alimentación	5V – 600 mA; conector micro USB
Sistema Operativo	Soporta Windows 10, Debian GNU/Linux, Fedora.

Por su ventaja de poseer puertos periféricos de bajo nivel o puertos GPIO se puede conectar todos los periféricos de la plataforma móvil, es decir, todos los sensores y actuadores del robot estarán conectados al computador.

Para la conexión de todos los elementos se diseña una placa electrónica de expansión de los puertos GPIO en la cual irá montada la Raspberry Pi 2. En la *Figura 56* se puede observar el esquema de la placa principal del robot.

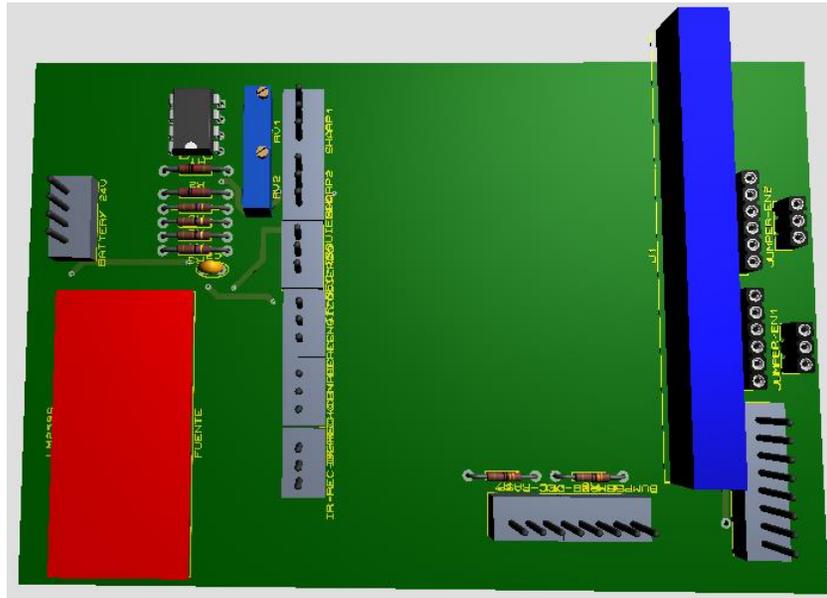


Figura 56. Esquema de la placa electrónica de la plataforma robótica móvil.

3.6.3. Diseño Final

Una vez realizado el diseño completo tanto en la parte mecánica, como en la parte electrónica se realiza la fusión de ambos diseños generando el módulo de estructura.

Para el diseño y construcción de cada uno de los elementos y estructura se ha pensado en su manufactura, costo y disponibilidad. La *Figura 57* junto con la Tabla 46 detalla los componentes de la plataforma robótica móvil.

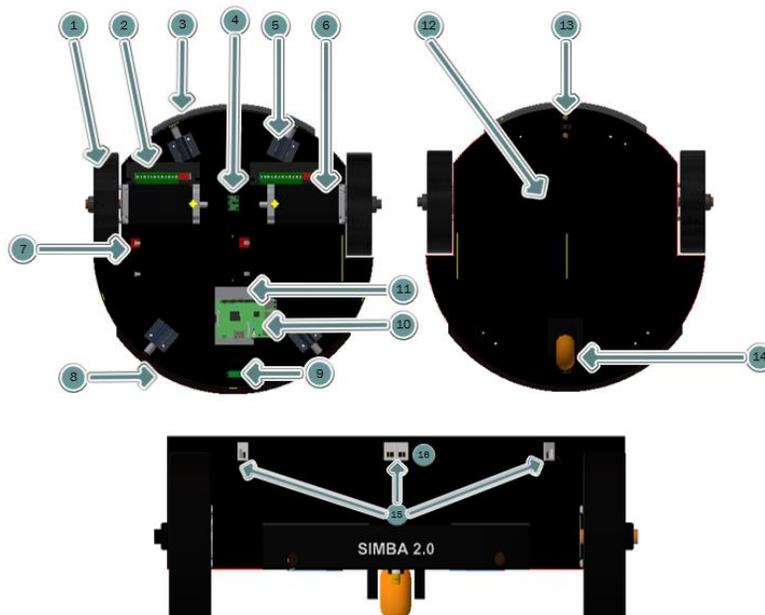


Figura 57. Modelo CAD y componentes del módulo de estructura.

Tabla 46

Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil.

Número	Descripción	#Elementos
1	Rueda Motriz	2
2	Driver Motor a Pasos	2
3	Bumper Trasero	1
4	Sensor IMU- Giroscopio	1
5	Tope de ventana	4
6	Motor a pasos	2
7	Batería 12V	2
8	Bumper Frontal	1
9	Sensor Sharp	2
10	Raspberry PI 2	1
11	Circuito Principal	1
12	Bastidor	1
13	Pines de Carga	1
14	Rueda seguidora	1
15	Soporte de receptores infrarrojos	3
16	Receptores Infrarrojos	4

En la *Figura 58* se puede observar el diseño final del módulo de estructura desde el punto de vista isométrico con cada uno de los elementos tanto mecánicos como electrónicos.

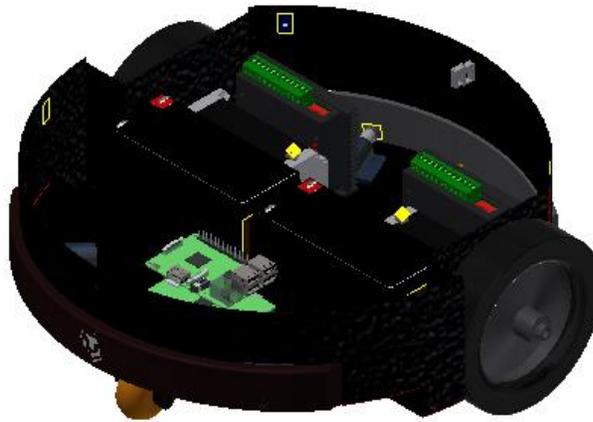


Figura 58. Módulo de estructura.

3.7. Módulo de Sensores

El módulo de sensores es una parte vital del presente proyecto ya que aquí se encuentran el subsistema de localización y mapeo al igual que el subsistema de navegación reactiva.

Para el diseño del módulo se debe tomar en cuenta las alternativas escogidas, al igual que el primer módulo de estructura donde se tendrá que ubicar.

3.7.1. Diseño Mecánico

Se considera dos puntos importantes los cuales son la ubicación de anillo de sonares y el sensor Rplidar omnidireccional. Al igual que otro factor a considerar es el aditamento de carga en el cual se podrán llevar diferentes objetos encima de la plataforma móvil.

Además de ellos se considera la forma principal del robot la cuál es circular, permitiendo la distribución del anillo de sonares.

3.7.1.1. Placa Base y Soporte del módulo de sensores.

La placa base para el módulo debe considerar en su diseño el anillo de sensores ultrasónicos que para efecto del anillo de sonares se usarán 12 sensores. Se debe tomar en cuenta el peso que se va a tener por el aditamento de carga., por lo que se tendrán 3 soportes que aguantarán el peso conjuntamente con la base.

En la *Figura 59* se puede observar la forma de la placa base del módulo y la ubicación de cada uno de los sensores y soporte para el aditamento de carga.

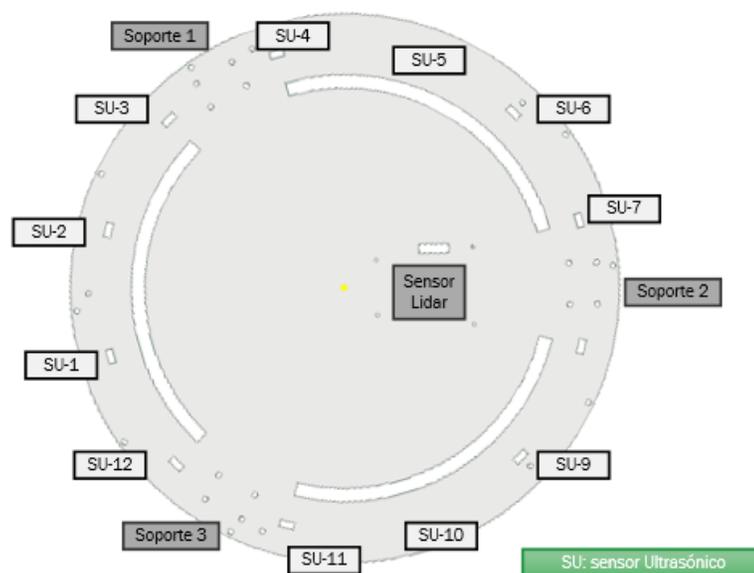


Figura 59. Forma y distribución de la placa base del módulo de sensores.

El archivo CAD de los soportes para el aditamento de carga que se ubican en la placa base se muestran en la *Figura 60*.

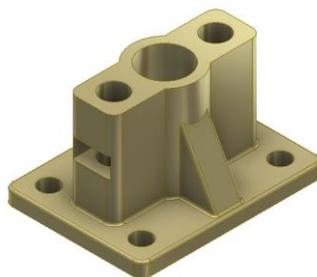


Figura 60. Soporte del Módulo de Sensores.

3.7.1.2. Análisis de Esfuerzos Placa Base

Para el análisis de esfuerzos sobre la placa base del módulo de sensores se debe tomar en cuenta todos los elementos que ejercen presión sobre la placa por efecto de su peso. En la Tabla 47 se muestra las consideraciones a tomar para el análisis de la placa.

Tabla 47

Consideraciones de cargas para el análisis en la placa base del módulo de sensores.

Cantidad	Descripción	Peso unitario (kg)
12	Sensores ultrasónicos	0,01
1	Sensor Lidar	0,2
1	Carga neta robot	5 kg
1	Placa electrónica	0,2

Por facilidad de manufactura se ha propuesto como material el ACRÍLICO, el cual, en 3 puntos principales debe soportar la carga superior del robot de 5 Kg. Como finalidad del análisis se establecerá el espesor del material.

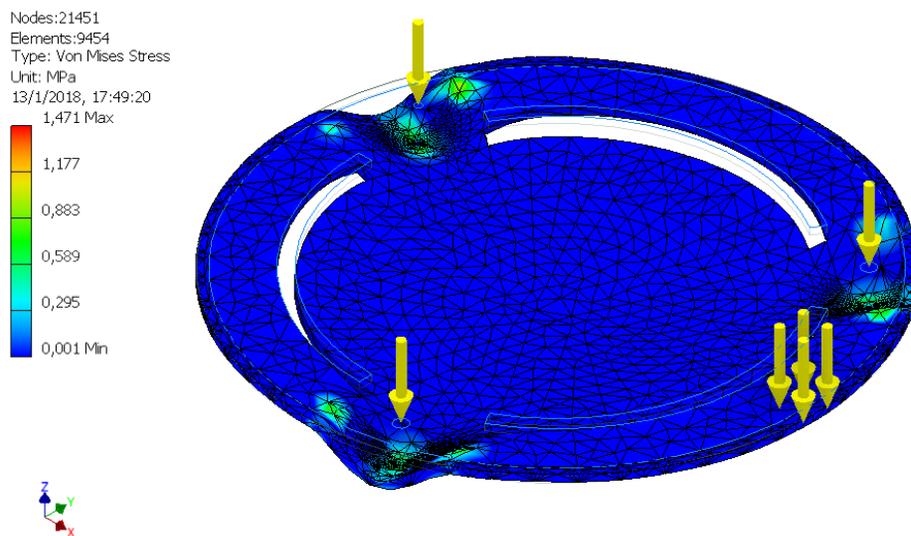
Con las cargas especificadas, se realiza un análisis CAE, para conocer los esfuerzos principales de la placa de acrílico. En la Tabla 48 se puede observar las características del material a usar para la fabricación de la placa base

Tabla 48*Propiedades del Material de la placa Base.*

Material	Acrílico
Espesor	5mm
Sy	48MPa
Sut	79,8MPa

En la Figura 61 se puede apreciar los esfuerzos en los puntos críticos, teniendo como máximo 1,47 MPa en ciertos puntos, conociendo que la resistencia máxima del acrílico en la fluencia es de 48MPa, se tiene un factor de seguridad de 15.

Al ser un valor muy alto, se podría disminuir el espesor del elemento, pero se opta por dejar tal dimensión por facilidad de adquisición del material y corte.

**Figura 61.** Análisis CAE con cargas estáticas en placa soporte de sensores.

La Figura 62 muestra el desplazamiento del elemento, que tiene como máximo en las zonas de color rojo de 0,046mm. Siendo un valor muy pequeño y despreciable.

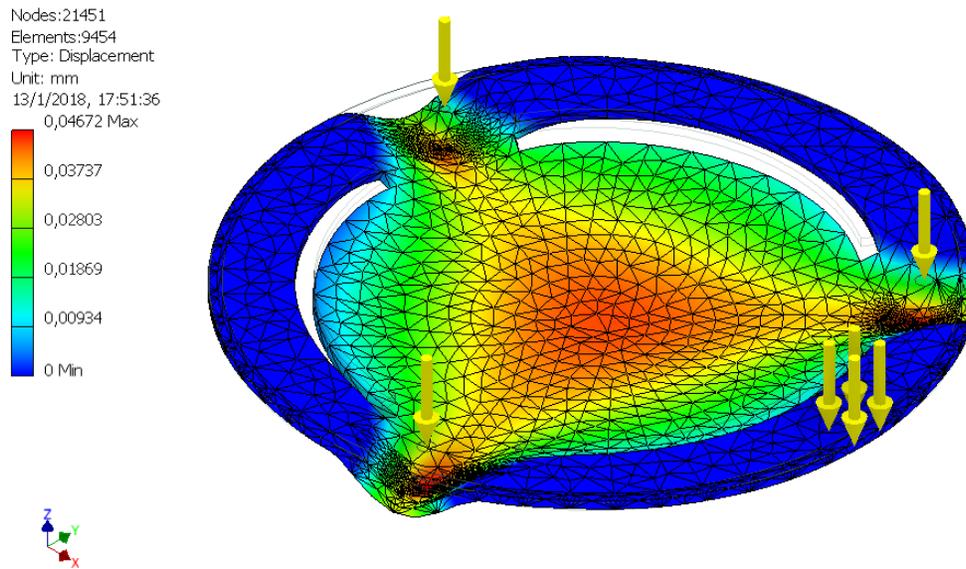


Figura 62. Deflexión en la placa base de módulo sensores del robot móvil.

3.7.1.3. Análisis de Esfuerzos Soporte

La plataforma móvil tiene la capacidad de carga establecida de 5Kg. La carga se establece a una altura de 50 cm desde del suelo, por lo que para mantener dicha carga elevada se requiere de postes metálicos.

Los postes metálicos están fijados a la base mediante unos soportes, en principio se ha pensado en impresión 3D para la fabricación del elemento.

La plataforma móvil será capaz de establecer aceleraciones y desaceleraciones, que con un peso elevado a una altura produce una fuerza y un torque reacción en los soportes.

La aceleración angular de los motores, llega a un máximo de 1000 pulsos/s^2 . Por lo que se transfiere esto a la aceleración centrípeta de la rueda. Conocido el radio de la rueda.

$$a = 1000 \frac{\text{puls}}{\text{s}^2} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1600 \text{ puls}} \times (0,075 \text{ m}) \quad (19)$$

$$a = 0,29 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (20)$$

Conocida la aceleración se calcula la fuerza en cada poste

$$F = \frac{1}{3} \times 5 \text{ Kg} \times 0,29 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,48 \text{ N} \quad (21)$$

La fuerza genera un torque sobre el poste que es igual a la reacción del soporte. (Longitud de poste 500 mm).

$$T = 0,48 \text{ N} \times 500 \text{ mm} = 241 \text{ N mm} \quad (22)$$

La simulación CAE tiene como carga el torque reacción, por lo tanto, los esfuerzos en el elemento mecánico se expresan en la Figura 63.

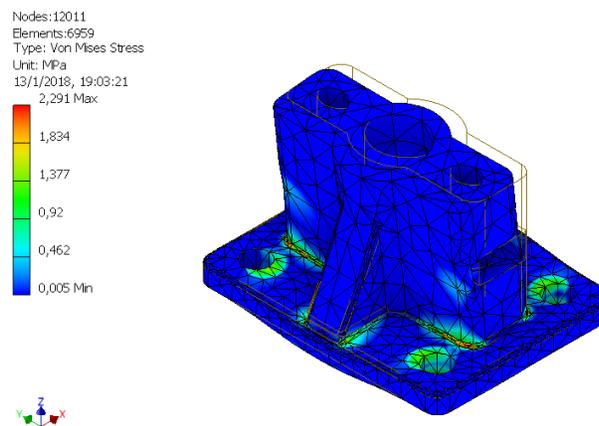


Figura 63. Simulación CAE de elemento de soporte de postes.

El esfuerzo máximo en el elemento es de 2,29 MPa en las áreas de color rojo. Con lo que se comprueba la validez de dimensiones.

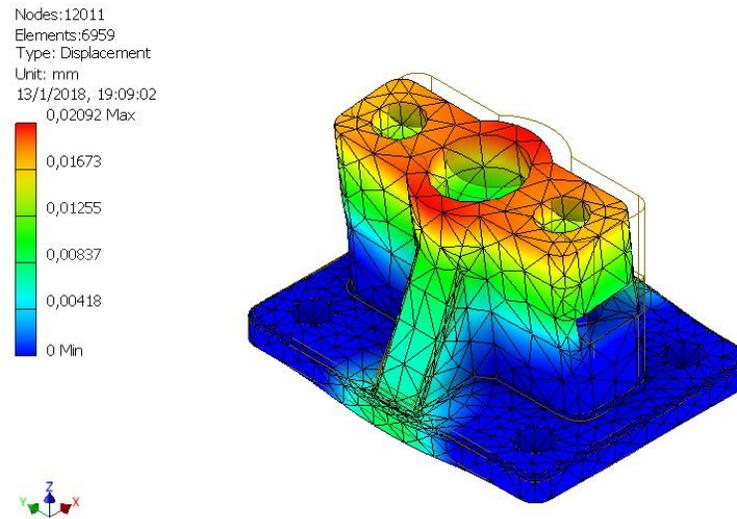


Figura 64. Deflexión del elemento mecánico de soporte de postes.

La deformación es de máximo 0,02mm, siendo muy pequeña y despreciable.

3.7.1.4. Malla de recubrimiento

Para evitar manipular los sensores ultrasónicos en el robot se debe cerrar el acceso a con una malla metálica que no interfiera en su medición. En la Tabla 49 se puede observar las dimensiones de la malla a adquirir para el módulo de sensores.

Tabla 49

Características Malla del módulo de sensores

Mesh	Espesor	Abertura
50	0,24 mm	0,40mm

3.7.1.5. Tapa módulo de sensores

Se realiza el diseño de una tapa para el módulo de sensores que permita que solo se pueda observar el sensor Lidar para su medición. Para la fabricación del mismo se usará acrílico de color negro brillante cortado en láser.



Figura 65. Tapa del módulo de sensores.

3.7.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico que corresponde al módulo de sensores constituye en la recepción de datos obtenidos por cada uno de los sensores que conforman el anillo de sonares al igual que él envió de datos tanto del anillo de sonares como del sensor Lidar. Se tendrá además una conexión directa con el minicomputador del módulo de estructura.

3.7.2.1. Sensores Ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos junto con el sensor Lidar son los que componen la navegación reactiva en la detección de obstáculos. Por la forma de percepción de los ultrasónicos se implementará 12 sensores ultrasónicos para formar el anillo de sonares.

En la *Figura 66* se muestra la formación del anillo de Sonares con la ubicación de los 12 sensores ultrasónicos ubicados por cada 30° del centro de la placa base del módulo de sensores.

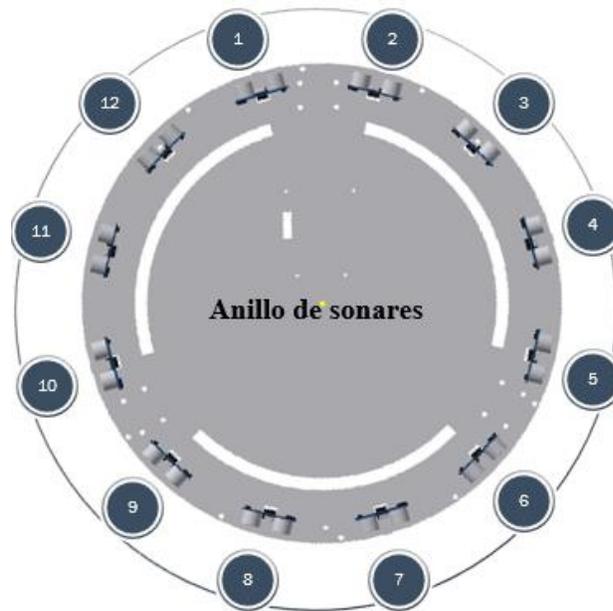


Figura 66. Distribución de Sensores ultrasónicos.

Todos los sensores ultrasónicos enviarán sus datos a la placa del módulo de sensores la cual será encargada de enviar a la placa principal.

3.7.2.2. Sensor Lidar

El sensor Lidar estará ubicado el centro con respecto a la ubicación de llantas por efecto de su medición, el sensor Lidar tendrá un bus de datos directo hacia el minicomputador principal.

En la *Figura 67* se puede observar el posicionamiento del sensor Lidar en la placa base del módulo de sensores.

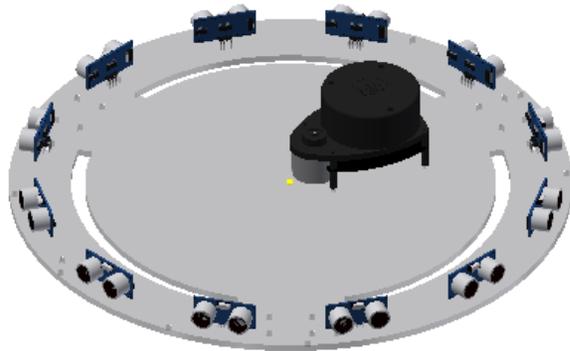


Figura 67. Posicionamiento del sensor lidar.

3.7.2.3. Adquisición y Envío de Datos

Debido a la cantidad de sensores ultrasónicos para la adquisición de datos del módulo de sensores se tendrá como componente principal al microcontrolador PIC16F877A, el cual estará encargado de la recepción de los 12 sensores ultrasónicos. Además de ello el PIC podrá obtener el voltaje que poseen las baterías del robot para inferir su carga.

En la *Figura 68* se puede observar el esquema del circuito de la placa principal que se instalará en el módulo de sensores.

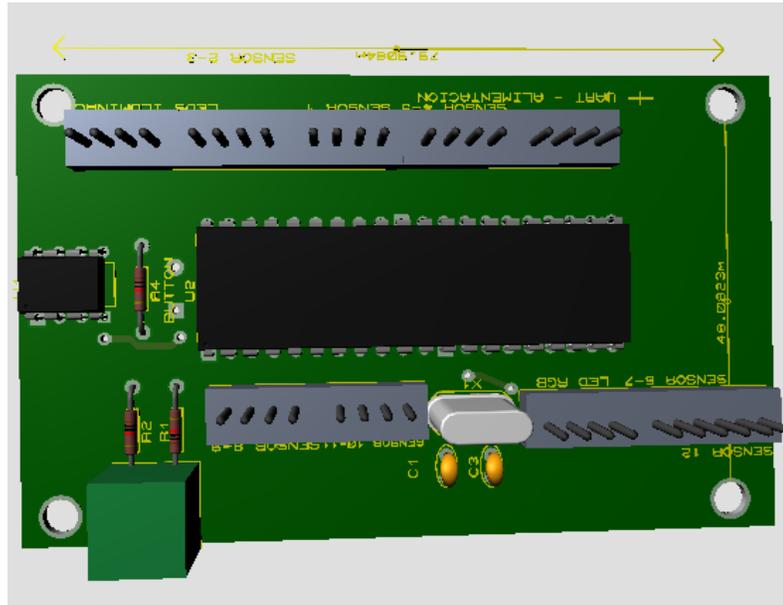


Figura 68. Esquema de la placa de adquisición y envío de datos del módulo de Sensores.

3.7.3. Diseño Final

Una vez realizado el diseño de cada una de las partes que componen el módulo de sensores se hace la fusión entre todos los elementos formando completamente el módulo de sensores. Se toma en cuenta que cada una de las partes del módulo tienen disponibilidad en el mercado y su construcción no lleva manufactura compleja.

En la *Figura 69* se puede observar la distribución de los elementos que conforman el módulo de sensores, mientras que en la *Figura 70* se puede observar el diseño final del módulo de sensores. En la Tabla 50 se puede observar todos los componentes del módulo de sensores.

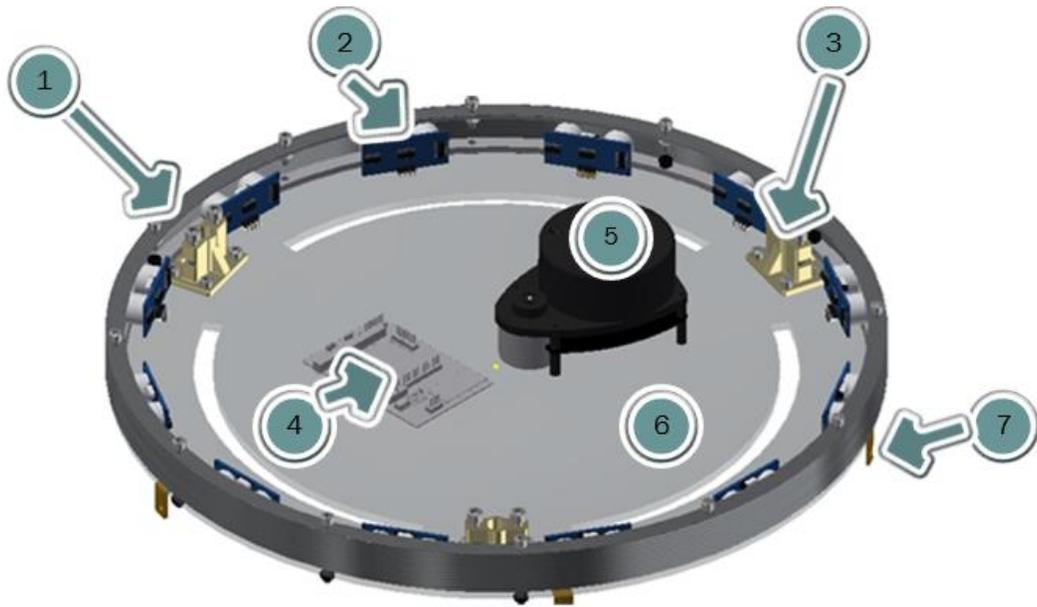


Figura 69. Moduló de sensores – Distribución



Figura 70. Módulo de sensores diseño Final.

Tabla 50*Componentes del Módulo de Sensores de la plataforma robótica móvil*

Número	Descripción	#Elementos
1	Malla Metálica	1
2	Sensor Ultrasónico	12
3	Soporte	3
4	Placa electrónica	1
5	Sensor Rplidar A1	1
6	Placa Base	1
7	Soporte L	5
8	Tapa de Módulo	1

3.8. Moduló de Estación de Carga

El módulo de estación de carga cumple con la función de abastecer al robot energéticamente cuando se encuentre sin la energía suficiente para operar.

3.8.1. Diseño Mecánico

Para el módulo de carga se realizará un bastidor el cual nos permita tener un acople con los pines de carga del módulo de estructura. El acople que tendrá la plataforma robótica móvil con la estación de carga será a través de una junta punto-superficie.

3.8.1.1. Análisis de Acople de la plataforma robótica móvil.

Para el acople de la plataforma robótica móvil con la estación de carga se realiza el análisis de los pines de carga implementados en el módulo de estructura. Dentro del módulo de estructura en la parte inferior se encuentran los pines de carga los cuales serán elaborados de material de bronce, por lo que deben hacer contacto en una superficie para realizar la carga eléctrica a las baterías.

Para el correcto apoyo en la superficie se debe tomar en cuenta el ángulo que forman los dos pines de carga con respecto a la superficie de contacto del robot. A partir del diseño CAD del módulo de estructura podemos obtener el ángulo con el cual se dará el adecuado acople entre el robot y la estación de carga.

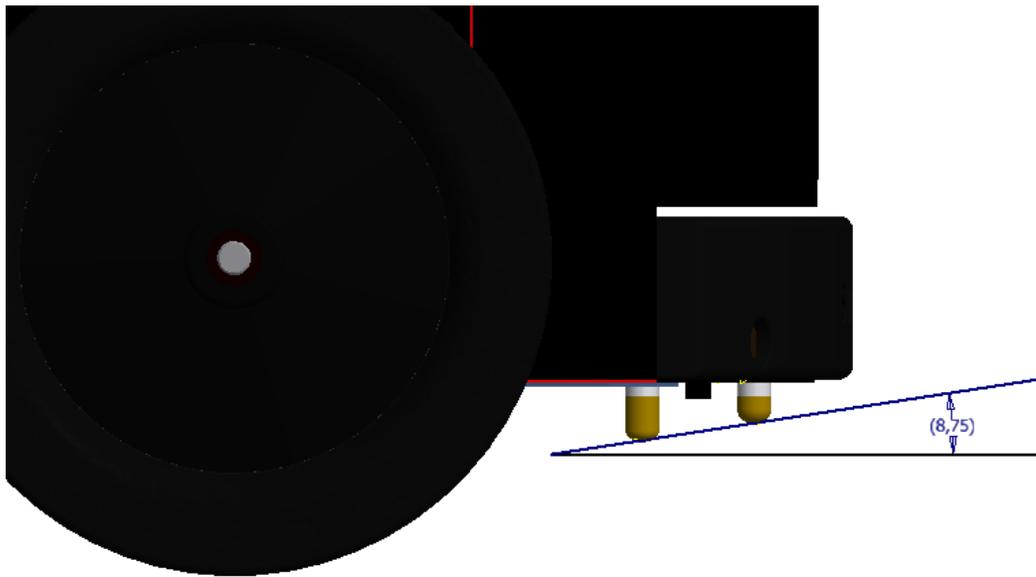


Figura 71. Ángulo de apoyo de los pines de carga.

En la *Figura 71* se puede observar el ángulo formado por la superficie de contacto del robot y el plano tangente a los pines de carga. El ángulo mostrado es de $\theta = 8,75^\circ$, tomando en cuenta el contacto que debe tener los pines de carga con el acople el ángulo a utilizar es de $\theta = 9^\circ$.

3.8.1.2. Sistema de Acople de la Estación de carga.

Definidos los pines de carga en el módulo de estructura de la plataforma robótica móvil, se realizará el sistema de acople con el cual el robot al posicionarse en la estación de carga tendrá la transferencia de energía por los pines de carga hacia las baterías del robot.

Al tener en cuenta que el plano de contacto forma un ángulo de 9° con los pines de carga de la plataforma móvil se tendrá un sistema en el cual el robot al irse posicionando en la estación de carga encontrará un pedal el cual es sujetado por un resorte para el sistema de un pedal, en la *Figura 72* se puede observar el sistema de pedal en el primer instante de cercamiento del robot.



Figura 72. Sistema de Pedal para acople de la plataforma móvil y estación de carga.

Una vez que el robot logre posicionarse correctamente en la estación de carga y se encuentre sobre el pedal de la estación de carga el resorte tendrá la función de generar la presión para que se el contacto entre los pines de carga y el pedal, el cual tendrá la función de la transferencia energética a los pines que están conectados a las baterías del robot., en la *Figura 73* se puede observar el acople final de la estación de carga con los pines de carga de la plataforma robótica móvil.



Figura 73. Sistema de acople del robot y la estación de carga .

Debido a la distribución de los pines ubicados en el módulo de estructura se debe tener en el sistema de pedal dos superficies con los cuales cada pin ubicado en el robot debe hacer contacto, tomando en cuenta en cuenta la polaridad para cada pin.

3.8.1.3. Pedal de Estación de Carga.

El sistema de pedal tendrá dos superficies de contacto con las cuales se podrá realizar el paso de carga a través de los pines de carga a las baterías del robot. El pedal tendrá una distancia en la cual no interfiera con la locomoción del robot tanto en si anclaje como su desanclaje.

Debido a la forma circular del robot la forma de pedal deberá tomar la misma forma del robot. En *Figura 74* se puede observar la forma del pedal que estará en la estación de carga para el acople con la plataforma robótica móvil.



Figura 74. Pedal de Acople de Estación de Carga.

Se muestra, además en la *Figura 74* el espacio donde se ubicarán las placas que permitirán la carga del robot separado por un espacio, evitando el contacto entre ellas.

3.8.1.4. Soporte de Placas de carga

Se tendrán dos soportes en donde estarán ubicadas las placas que tendrán la función de carga a los pines de la plataforma robótica móvil. Los soportes serán instalados en el pedal.

Los dos soportes serán diseñados de un material plástico PLA usando la impresión 3D. En la *Figura 75* se puede observar el diseño CAD de los soportes para las placas de contacto.

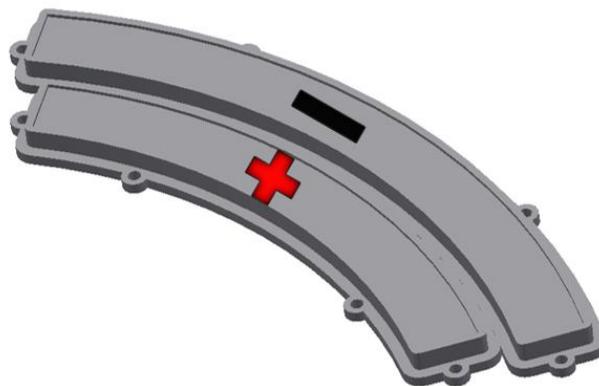


Figura 75. Diseño CAD de Soportes de placa de carga.

3.8.1.5. Placas de Carga

Para el paso de la energía eléctrica desde la estación de carga y la plataforma robótica móvil se tendrán dos placas, las cuales serán elaboradas de un material conductor como lo es el aluminio y estarán sobre sus soportes tal como se muestra en la *Figura 76*.

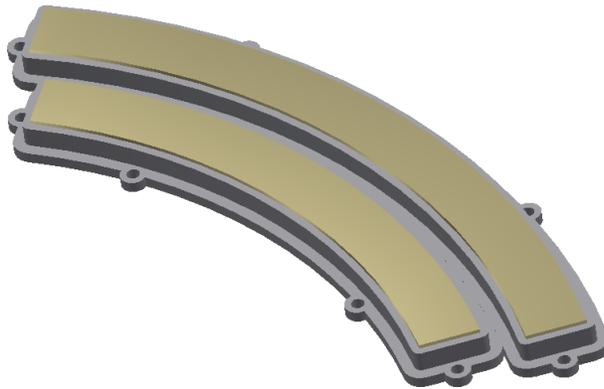


Figura 76. Diseño CAD de las Placas de la estación de carga.

3.8.1.6. Estructura de la Estación de carga

Una vez definido el sistema de acople, el cual es conformado por un sistema de pedal, se procede a diseñar toda la estructura de la estación de carga en la cual se va a implementar el sistema de pedal y todo el sistema electrónico que hará posible la carga de la plataforma robótica móvil.

La estructura de la estación de carga tendrá la forma circular del robot para un acople óptimo y permisible a errores de posicionamiento. En la *Figura 77* se puede observar el diseño CAD de la estación de carga.



Figura 77. Diseño CAD de la estructura de la estación de carga.

En la *Figura 77* se puede observar a la estructura de la estación de carga en la cual en su base se instalará el sistema de pedal, su contorno será construido de chapa metálica galvanizada de 1,1 mm de espesor.

3.8.1.7. Soporte de Emisores infrarrojos

El posicionamiento del robot móvil está a cargo de los sensores infrarrojos, como se describe en el módulo de estructura se implementaron receptores infrarrojos, por lo que para que el envío y recepción de señal para un correcto posicionamiento de la plataforma robótica móvil en la estación de carga se implementarán los emisores ultrasónicos.

Dentro del soporte se implantarán 3 emisores infrarrojos los cuales estarán ubicados en la parte lateral derecha y lateral izquierda, mientras que el tercero se ubicará en la parte central del soporte.

En la *Figura 78* se puede observar el diseño CAD del soporte de los emisores infrarrojos, donde se puede observar la ubicación de los emisores infrarrojos con sus respectivos soportes, los componentes se pueden observar en la *Tabla 51*.

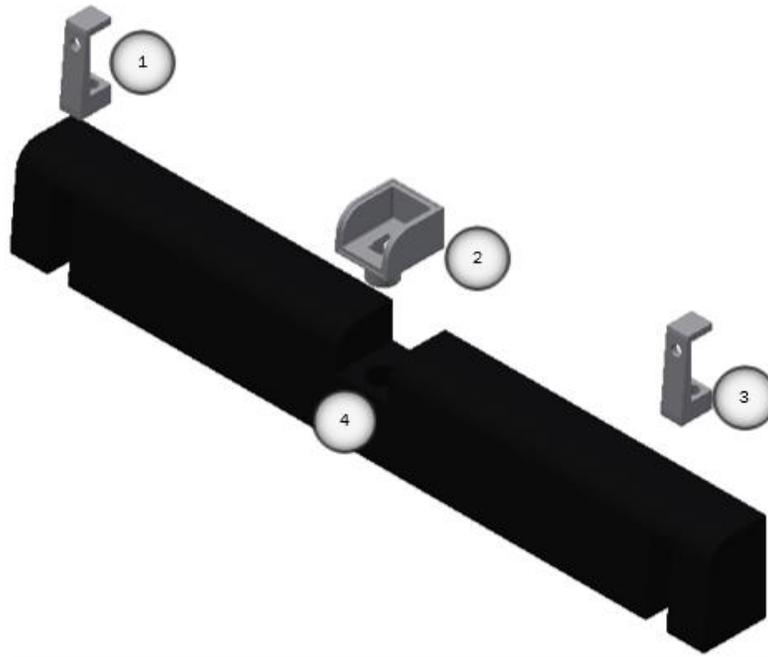


Figura 78. Componentes de soporte de emisores infrarrojos.

Tabla 51

Soporte de emisores infrarrojos.

Número	Descripción
1	Soporte lateral derecho
2	Soporte Central
3	Soporte Lateral izquierdo
5	Soporte Principal

3.8.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico que corresponde al módulo de estación de carga constituye en la alimentación energética de la plataforma robótica móvil. Así como también estará a cargo del envío de una señal por medio de los emisores infrarrojos para el posicionamiento del robot.

3.8.2.1. Emisores Infrarrojos

Los emisores infrarrojos estarán ubicados estratégicamente para generar un envío de señal correcta y clara a los receptores infrarrojos ubicados en el módulo de estructura del robot. Para el funcionamiento de los emisores infrarrojos se tendrá la emisión modulada de 38Khz, es decir, 36.32 microsegundos.

El funcionamiento de los emisores infrarrojos será a través de una señal modulada a 38 Khz en la cual cada emisor no se superponga en la señal de los otros emisores. Para que no se dé la superposición entre las señales de modo que afecte en la señal modulada que deben obtener el robot en su posicionamiento se tendrá un único pulso mientras que los otros dos no emitan ninguna señal.

EL funcionamiento se dará con un pulso inicial similar en cada emisor continuando con una pausa, posteriormente se dará el primer pulso enviado por el primer emisor, luego de una espera se emitirá el pulso en el segundo emisor y el mismo ciclo con el tercer emisor. La señal enviada por los emisores infrarrojos se puede observar en la *Figura 79* con el pulso inicial y el pulso único de cada emisor infrarrojo.

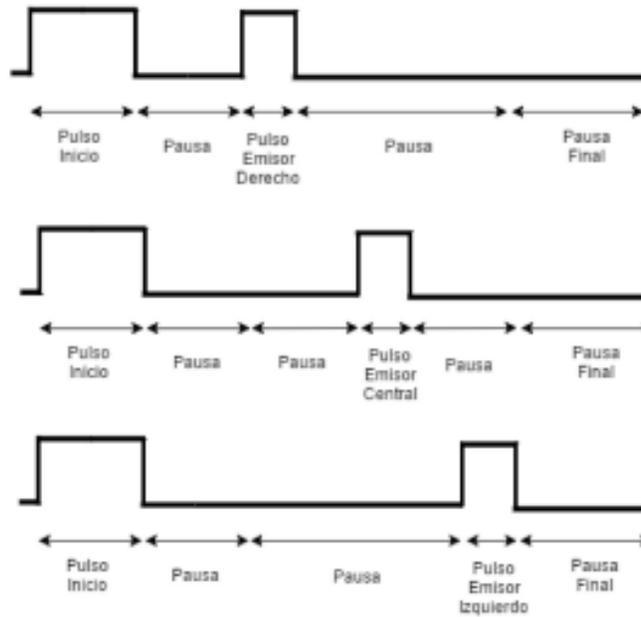


Figura 79. Señal Modulada de emisores infrarrojos.
Fuente: (Vera Durán, 2016)

No obstante, si se da el correcto funcionamiento en cada uno de los emisores infrarrojos la señal superpuesta completa modulada para la percepción de la plataforma se muestra en la *Figura 80*.

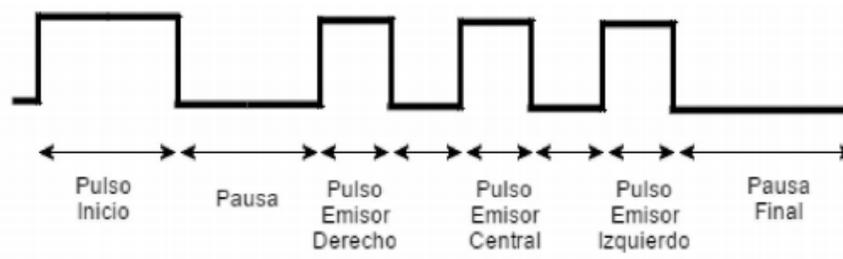


Figura 80. Señal superpuesta recibida en los receptores infrarrojos.
Fuente: (Vera Durán, 2016)

Las señales emitidas serán recibidas a través de los receptores infrarrojos ubicados en la plataforma robótica móvil, en cuanto el robot se acerque a la zona de emisión. La zona en que la estación de carga emitirá su señal de los emisores infrarrojos se muestra en la *Figura 81*.

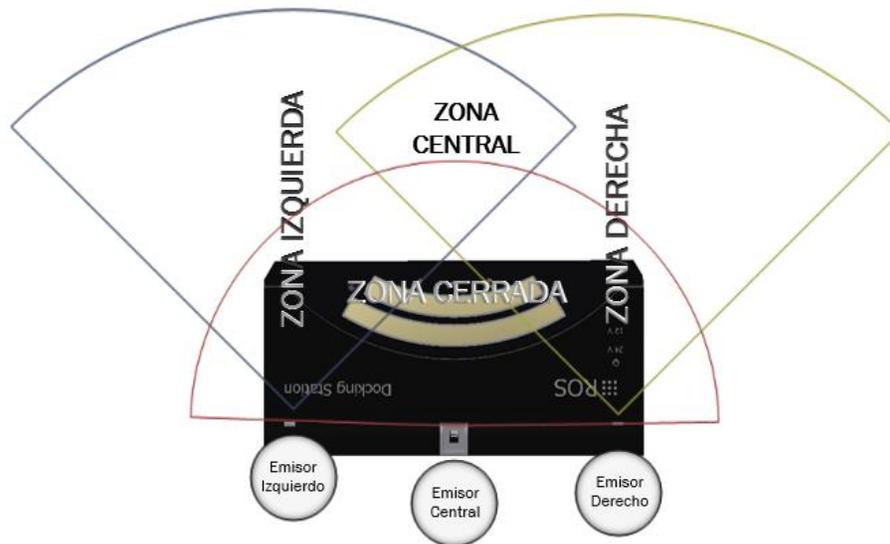


Figura 81. Zona de emisión de los emisores infrarrojos.

3.8.2.2. Circuito de Carga

La función principal de la estación de carga es la alimentación eléctrica a la plataforma robótica móvil cargando las baterías con un voltaje de 24[V], para ello en la se implementará un circuito rectificador de onda completa. En la *Figura 82* se muestra el circuito rectificador de onda completa.

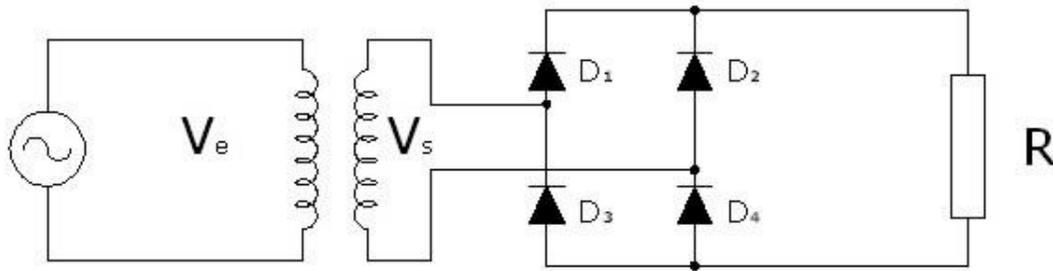


Figura 82. Circuito Rectificador de onda completa.

La implementación del circuito se lo realizará con un transformador 120V 24V 10A. El puente de diodos de y el transformador escogidos según la corriente de carga de las baterías, según las pruebas realizadas es de 8A.

El circuito estará conectado hacia las placas de aluminio del sistema de pedal de la estación de carga lo que permitirá que el robot pueda obtener alimentación eléctrica. Mediante el circuito se podrá generar carga para baterías de 12V y 24V, el cual podrá ser seleccionado mediante un switch de tres estados.

3.8.2.3. Generación de datos modulados

La estación de carga estará controlada por un microcontrolador Arduino NANO. La tarjeta Arduino estará a cargo de la generación de las señales que serán emitidas por los emisores infrarrojos.

El sistema de envío de datos hacia los Led infrarrojos emisores se establecerá en una placa electrónica conjuntamente con el circuito de carga de las baterías. Al igual que la conexión hacia las placas del pedal de la estación de carga. En la Figura 83 se puede observar la el modelo de la placa principal que estará a de la estación de carga.

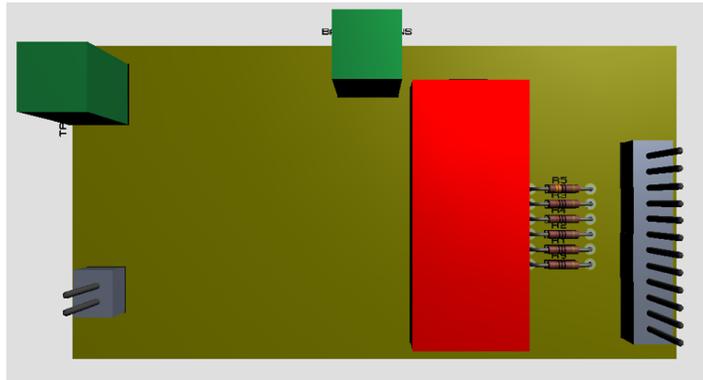


Figura 83. Placa Electrónica de estación de carga.

3.8.3. Diseño Final

Una vez realizado el diseño de cada una de las partes que componen el módulo de estación de carga se hace la fusión entre todos los elementos formando completamente el módulo. Se toma en cuenta que cada una de las partes del módulo tienen disponibilidad en el mercado y su construcción no lleva manufactura compleja.

En la *Figura 84* se puede observar el diseño CAD final del módulo de estación de carga a fabricar e implementar en el sistema de la plataforma robótica móvil.



Figura 84. Diseño CAD de módulo de estación de Carga.

3.9. Aditamento de Carga

El aditamento de carga de la plataforma móvil será diseñado para poder movilizar elementos sobre el robot móvil. Se tiene como máximo una carga de 5Kg por lo que su diseño será únicamente mecánico

3.9.1. Diseño Mecánico

Para el aditamento se diseñará una base para llevar elementos como un ordenador portátil y sobre ella un compartimento para otros tipos de elementos.

3.9.1.1. Ejes de soporte

Para el diseño de los ejes que soportarán la carga y que estarán ubicados en el módulo de sensores se determinará el mínimo diámetro para que pueda soportar.

La plataforma robótica móvil tiene una carga establecida de 5kg que estarán sujetos a través de soportes. Se tendrán 3 soportes efectuarán el trabajo en la plataforma móvil.

Para la obtención del diámetro se pretende hacer el análisis del soporte con el teorema del análisis de columnas con la ecuación de Euler. Se tiene que la carga máxima que se obtendrá es de 5kg, por lo cual con ella se realizará el respectivo análisis, se considera además un factor de seguridad de 4. En la Tabla 52 se muestra las características del material a usar en el diseño de los ejes.

Tabla 52

Características del Material para los ejes.

Material	Acero A36
Sy	250MPa
E	200 GPa

Con el material escogido se procede a obtener la carga crítica para la cual estará trabajando la plataforma robótica móvil.

$$P_{cr} = 4 \times 5kg \quad (23)$$

$$P_{cr} = 20kg \quad (24)$$

$$P_{cr} = 20kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} \quad (25)$$

$$P_{cr} = 196.2 N \quad (26)$$

Para el análisis de la columna se tiene que tomar en cuenta su esbeltez, se puede observar en la *Figura 90* la forma de apoyo de la Columna. Se muestra que la columna se encuentra **Empotrada** – **Articulada** por lo que el factor de esbeltez para el tipo de columna es de $K= 0.7$

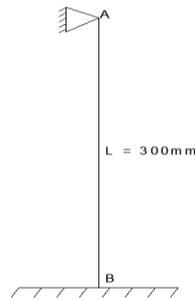


Figura 85. Representación de la Columna.

Al aplicar la Fórmula de Euler, se procede a obtener el diámetro óptimo para cada uno de los soportes.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(K \times L)^2} \quad (27)$$

EL momento de inercia para una sección circular está dado por:

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad (28)$$

Por lo que el diámetro para la columna se obtiene:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times \frac{\pi \times d^4}{64}}{(K \times L)^2} \quad (29)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^3 \times E \times d^4}{64 \times (K \times L)^2} \quad (30)$$

$$d^4 = \frac{P_{cr} \times 64 \times (K \times L)^2}{\pi^3 \times E} \quad (31)$$

$$d^4 = \frac{196.2N \times 64 \times (0.7 \times 300\text{mm})^2}{\pi^3 \times 200\text{GPa}} \quad (32)$$

$$d^4 = 89.3 \text{ mm}^4 \quad (33)$$

$$d \approx 3.07 \text{ mm} \quad (34)$$

El diámetro mínimo obtenido para los soportes es de 3.07mm, por lo que para la plataforma robótica móvil optaremos por un diámetro de 10mm.

$$d = 10 \text{ mm} \quad (35)$$

3.9.1.2. Placas Base

Las placas base estarán de soporte para cada uno de los elementos que se desee transportar, tanto en la parte inferior como en la parte superior. Se tiene dos bases que se realizarán en madera MDF las cuales estarán sujetados a los postes por medio de bujes. En la *Figura 86* se puede observar la forma de la base que se construirá para el aditamento de carga tanto para la parte inferior como la parte superior.

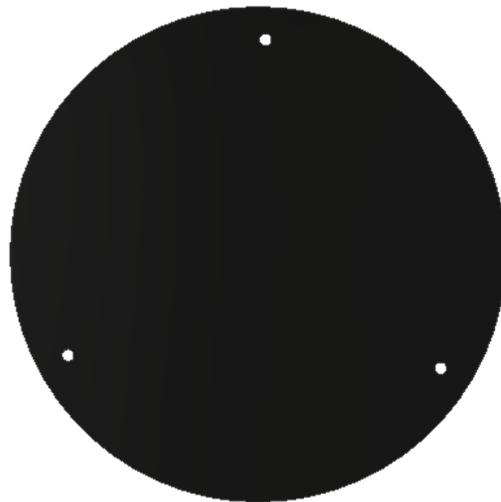


Figura 86. Base del aditamento de carga.

3.9.1.3. Contorno de Compartimento

El contorno para el compartimento será realizado de placa de acero galvanizado de 0,7mm de espesor. Con él se formará el compartimento para la transportación de elementos sobre el robot. En la *Figura 87* se muestra el contorno que estará acoplado a la placa base superior del módulo.

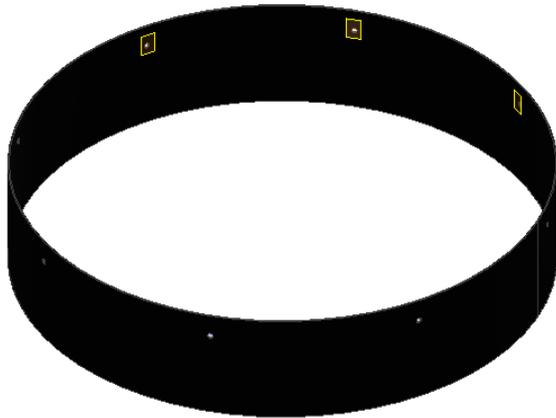


Figura 87. Contorno del compartimento del aditamento de carga.

3.9.2. Diseño Final

Una vez realizado cada uno de los elementos del aditamento de carga se procede a conformar todas las partes obteniendo el diseño final, el cual será incorporado a la plataforma robótica móvil en los soportes del módulo de sensores.

En la *Figura 88* se puede observar el diseño CAD final del aditamento de carga con cada uno de sus componentes, al igual que en la Tabla 53 se detallan los componentes del aditamento de carga.

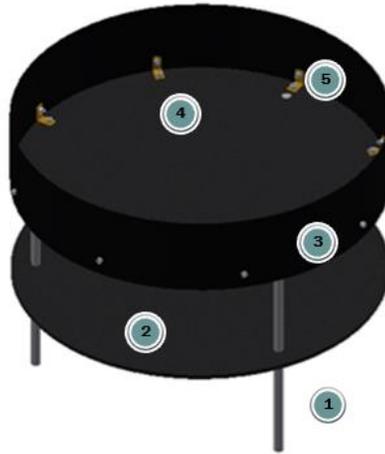


Figura 88. Diseño fial del aditamento de carga.

Tabla 53

Componentes del aditamento de carga de la plataforma robótica móvil.

Número	Descripción	#Elementos
1	Eje de soporte	3
2	Placa base	1
3	Placa base	1
4	Contorno	1
5	Soporte L	8

3.10. Diseño Final

Una vez realizado cada uno de los módulos que componen se procede a realizar el ensamble del prototipo del nuevo diseño de la plataforma móvil para interiores. La cual se construirá mediante procesos convencionales, además de la disponibilidad de los elementos a usar en la construcción. La *Figura 89* junto con la *Tabla 54* detallan los módulos de la plataforma robótica móvil.

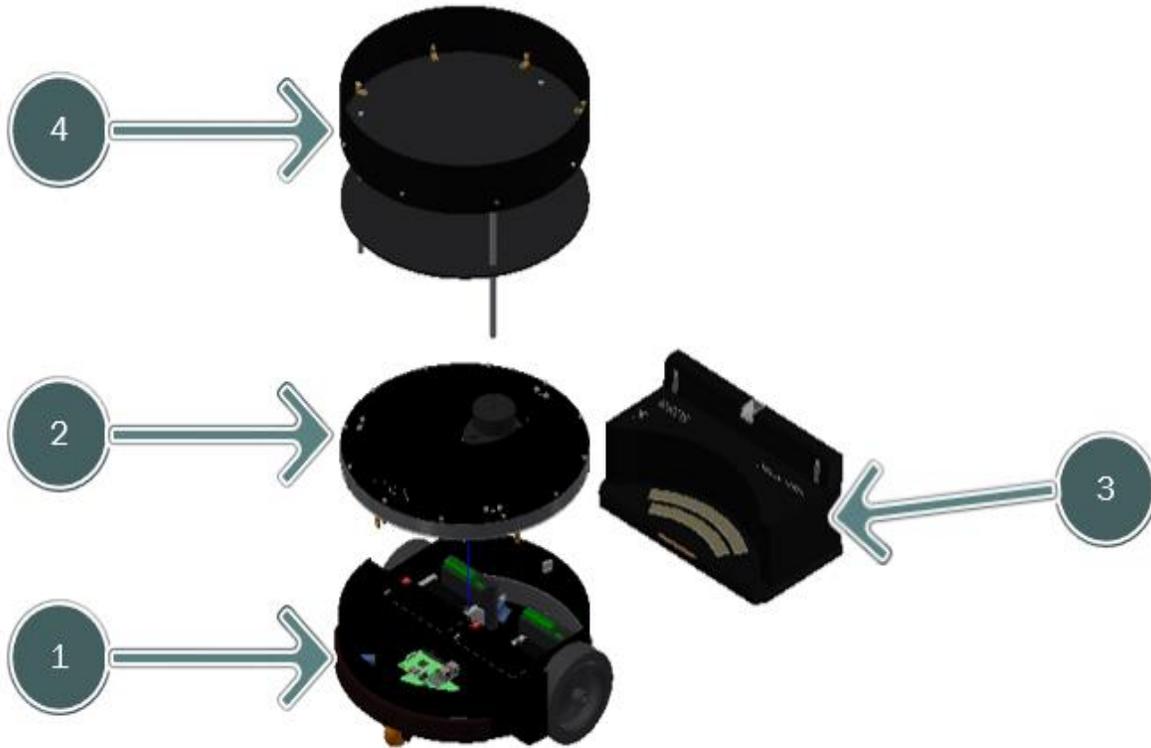


Figura 89. Modelo CAD de la plataforma robótica móvil.

Tabla 54

Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil.

Número	Módulo	Función
1	Estructura	Es la base principal de la plataforma robótica móvil la cual posee el minicomputador que controla todo el robot, al igual que se encarga de la movilidad del robot.
2	Sensores	Es la encargada de obtener las mediciones para la función de localización y mapeo al igual que navegación reactiva.
3	Estación de Carga	Es la encargada de abastecer energéticamente al robot cuando se encuentre sin energía suficiente para trabajar.
4	Aditamento de Carga	Su función principal es poder transportar elementos sobre el robot con un peso máximo de 5kg

3.11. Resumen

Las matrices de selección permitieron obtener la mejor alternativa para la resolución de cada subsistema. Las necesidades se evaluaron y agruparon para obtener características técnicas objetivo del diseño.

Se obtuvieron 6 subsistemas los cuales son: 1) Estructura y soporte, 2) Locomoción, 3) Localización y Mapeo, 4) Navegación reactiva, 5) Planificación y trayectoria y 6) Estación de Carga.

Para la plataforma robótica móvil se obtuvo las siguientes alternativas: 1) Bastidor de forma Circular, 2) Sistema de Rueda diferencial, 3) Sensor Lidar omnidireccional 360°, 4) Anillo de Sonares, 5) Uso de Localización y navegación y 6) Posicionamiento con sensores infrarrojos.

Para la plataforma robótica móvil se crearon 4 módulos los cuales son: 1) Modulo de Estructura, 2) Módulo de Sensores, 3) Módulo de estación de carga 360°, 4) Aditamento de carga.

Capítulo 4

Construcción y pruebas

En el presente capítulo se describe la construcción de cada componente mecánico y electrónico que conforman la plataforma móvil de interiores, luego se detalla las pruebas realizadas con sus resultados.

4.1. Estructura

La plataforma de interiores está construida a base de planchas de acero galvanizado de espesor 1.1 mm. La estructura conforma la base del robot y los contornos.

4.1.1. Corte en agua de la estructura

Debido a la forma de la plataforma de interiores y la existencia de cavidades internas en las planchas de acero galvanizado para alojar parte de los motores, el proceso de corte en agua CNC es necesario. El proceso permite obtener la forma deseada sin modificar las propiedades mecánicas del material ya que no produce calentamiento, así también se evita que las planchas se doblen por el calor en comparación a otros procedimientos de corte.

4.1.2. Soldadura de la estructura

Los contornos de la estructura previamente cortados fueron sometidos al proceso de barolado para obtener la forma circular del diseño, como lo muestra la *Figura 90*.



Figura 90. Proceso de barolado de contornos de la estructura.

La estructura fue ensamblada con soldadura SMAW, con electrodo 6011 3/32. Con el objeto de no calentar las placas de la estructura se realizaron varios puntos de soldadura en todo el contorno, como lo muestra la



Figura 91. Estructura soldada por técnica de puntos en el contorno.

La estructura de la estación de carga también fue ensamblada con procedimiento de soldadura SMAW por puntos, en material de acero galvanizado.

4.1.3. Maquinado de acoples de motores y pines de carga

Los motores seleccionados poseen una ranura que permite acoplar a otro elemento mecánico mediante un tornillo prisionero. Los acoples diseñados permiten transmitir el movimiento desde el motor hacia las ruedas directamente.

Los acoples de los motores fueron fabricados en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el material utilizado fue acero de transmisión AISI 1018 por sus características de gran resistencia y fácil maquinado. El acople posee un agujero roscado transversal para la inserción de un tornillo prisionero M4. Para la sujeción con la rueda posee un agujero transversal M5.

Para los pines de carga se utilizó bronce dulce, el cual es aleación de Bronce 80% y Zinc 20%, gracias a su alta composición de cobre y baja resistividad eléctrica. Se maquinaron los pines adicionando un roscado M5, necesario para la sujeción a la estructura.

4.1.4. Impresión 3D de bumpers

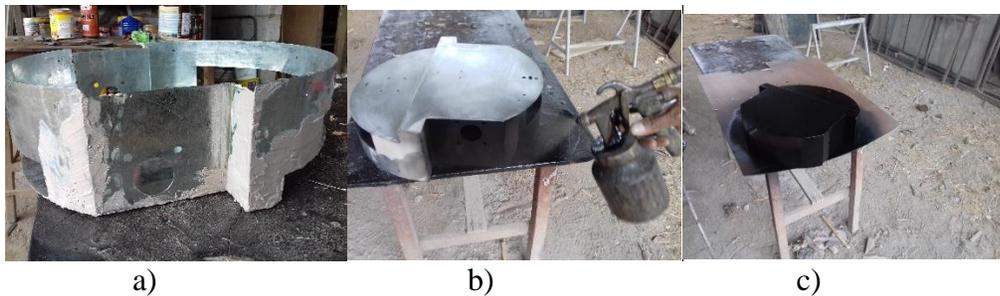
Los bumpers del robot fueron impresos mediante las máquinas de prototipado existentes en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Se utilizó la máquina CATALYST Stratasys para el bumper delantero y la máquina MAKERBOT Replicator 2x para el bumper trasero. Se muestran en la *Figura 92* los bumpers instalados en el robot.



Figura 92. (a) bumper delantero (b) bumper trasero

4.1.5. Pintura de la estructura

La estructura de acero galvanizado fue sometida al proceso de limado y lijado de la superficie para eliminar las aristas vivas. Posteriormente se realizó un masillado completo para tapar espacios dejados por la soldadura como se observa en la *Figura 93*. Así se logra sellar completamente la estructura y prevenir el ingreso de polvo hacia los motores y drivers del robot.



a) b) c)
Figura 93. Acabados en estructura de robot móvil.
Nota: (a) Masillado de bordes (b) Pintura (c) Lacado.

La estructura fue cubierta con pintura anticorrosiva de color negro, para posteriormente aplicar una capa de laca catalizada transparente mate, con la finalidad de evitar rayones, proteger del ambiente y mejorar la estética.

4.1.6. Ensamblaje de motores y rueda loca

Los motores fueron ensamblados a la estructura mediante tornillos Allen DIN 912 M5x20, primeramente, ubicando los motores en las cavidades previamente cortadas en agua y sujetando a la estructura con los tornillos y tuercas.



a) b)
Figura 94. Ensamble de motores y acople, Ensamble de rueda loca.

En la rueda loca delantera adquirida fue necesario ensamblar con arandelas para asegurar el apriete correcto en el agujero de fábrica de la rueda. La sujeción se realizó mediante tornillos Allen M5x10.

4.1.7. Sujeción de otros elementos

En la estructura se deben fijar los bumpers, los cuales deben ser retráctiles, por lo que se utilizaron broches de presión que permiten un movimiento pistón – cilindro restringido con un resorte como lo muestra la *Figura 95*. El resorte permite regresar al bumper a la posición normal luego de la colisión.



Figura 95. Broche de presión retráctil

Los bumpers requieren fines de carrera, los cuales también ubicados en la base del robot fueron colocados de tal forma que, si una fuerza externa golpea al bumper, el fin de carrera haga un cambio de estado. Los fines de carrera están sujetos a la base del robot mediante tornillos M3x10.

Las baterías para evitar su movimiento dentro del robot, fueron sujetadas mediante ángulos, los cuales ubicados sobre la base de la plataforma de interiores permiten que las baterías ingresen a una cavidad y así evitando su movimiento. Los ángulos son fijados a la base mediante tornillos M3 x 10.



Figura 96. Montaje de placa electrónica, baterías y drivers.

Para la sujeción de los drivers de motores se utilizaron tornillos Allen M4. También en la estructura se instaló un switch de encendido – apagado. El switch tiene forma circular y tiene alas exteriores de plástico para su ajuste con la cavidad en la base del robot, por lo que no requiere ningún tipo de sujeción por tornillos.

Se montaron en la base del robot móvil sensores Sharp mediante tornillos M2, como lo muestra la *Figura 97*

Los pines de carga fueron montados en el robot, en la parte trasera, con el apriete de tuerca M5 en los pines previamente maquinados y roscados, como lo muestra la *Figura 97*.

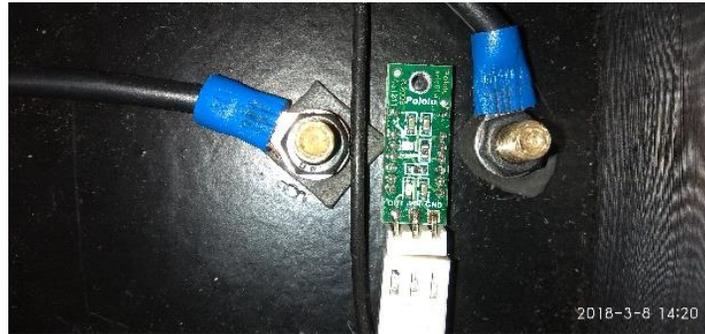


Figura 97. Montaje de pines de carga en el robot móvil y sensor Sharp.

4.1.8. Tarjeta electrónica

La plataforma robótica posee una Raspberry PI 2, la cual sirve para controlar los motores y obtener los datos de los sensores, por lo que fue necesaria la construcción de una tarjeta electrónica de expansión de los puertos GPIO de la Raspberry PI, como lo muestra la *Figura 98*.

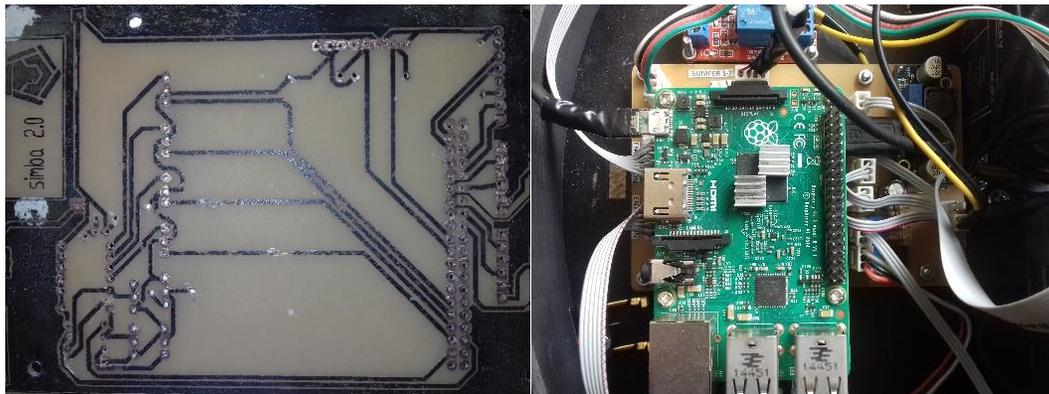


Figura 98. Placa electrónica de expansión de puertos GPIO.

La tarjeta electrónica también cuenta con un conversor DC – DC, el cual obtiene la energía de las baterías que proveen de 24 VDC. El conversor reductor permite proveer de energía a los sensores y la computadora Raspberry PI a 5VDC con un máximo de 3A de corriente.

Para facilidad de conexión de los diferentes sensores la tarjeta fue construida con acoples Molex, también se realizó la sujeción de la tarjeta a la base mediante tornillos M3 x10.

4.2. Módulo de sensores

Comprende el alojamiento de los sensores de tipo ultrasonido, así como también los LED indicadores de estado de carga de baterías y el posicionamiento del sensor LIDAR adquirido. El módulo de sensores completo se puede observar en la *Figura 102*.

4.2.1. Corte láser de bases

La base del módulo se construyó mediante el proceso de corte láser en acrílico transparente de 5mm, debido a la forma circular y cavidades internas del mismo.

La tapa superior del módulo de sensores también se construyó mediante corte láser en acrílico negro 3mm. Se lograron las formas especiales para la cavidad del sensor LIDAR y los logos del sistema operativo.

4.2.2. Impresión 3D de soportes

El módulo de sensores posee soportes que permiten empotrar los elementos del aditamento de carga. Por lo que se construyeron mediante impresión 3D en la impresora Makerbot Replicator 2x.

4.2.3. Malla contorno

La malla de contorno del módulo de sensores se fabricó mediante el proceso de corte y posteriormente doblado para lograr la forma circular del robot. Fue ensamblada tanto a la base del módulo como a la tapa mediante anillos de sujeción y con tornillos Allen M4x10.

4.2.4. Ensamble de sensores

Los sensores ultrasónicos fueron insertados en Molex tipo hembra, los cuales están fijos a la base del módulo y para asegurar su sujeción se ha colocado pegamento para unir piezas de plástico, como se muestra la *Figura 99*.



Figura 99. Montaje de sensores ultrasónicos en la base del módulo.

4.2.5. Tarjeta electrónica

El módulo de sensores ultrasónicos posee su tarjeta electrónica para obtener los datos de cada sensor y también permite conocer el estado de carga de las baterías.

La tarjeta electrónica se construyó a base de placas de cobre quemada al ácido percloruro de Hierro con sus componentes electrónicos soldados con estaño. La PCB posee conectores tipo Molex para la conexión con los sensores ultrasónicos y también para la obtener la energía desde las baterías y la comunicación serial que posee con el computador central.



Figura 100. Construcción placa electrónica.

La placa electrónica fue fijada a la base del módulo mediante la impresión 3D de una pieza de sujeción que permite colocar tornillos M3x10 como se muestra en la *Figura 100*.

4.2.6. Sensor LIDAR

El sensor LIDAR adquirido es completamente funcional sin necesidad de componentes mecánicos o electrónicos extra, aun así, es necesario mantener el sensor fijo al robot y tomando en cuenta que sea desmontable para su limpieza y mantenimiento.

El sensor LIDAR posee 4 postes para su sujeción, cada poste permite la inserción de un tornillo M2,5. Además posee una placa electrónica de control conectada a través de un bus de datos.

La placa de control tiene conexión USB que permite la comunicación con la computadora de abordo. Se toma en cuenta la longitud y calidad del cable USB para la transmisión de datos a velocidad de 115200 bits/s, es importante que la longitud del cable no exceda los 70cm puesto que existe alta probabilidad de errores.



Figura 101. RPLidar A1
Fuente: (Slamtec.com)



Figura 102. Módulo de sensores ensamblado.

4.3. Estación de carga

4.3.1. Estructura

La base de la estructura de la estación de carga fue hecha de madera MDF con chapas de madera en las caras, construida por proceso de corte en una caladora de cinta.

El contorno de la estación de carga se fabricó de plancha de acero galvanizado de 1,1 mm de espesor con proceso de soldadura SMAW mediante puntos de suelda.

El contorno está ensamblado en la base con ángulos metálicos sujetos con tornillos de madera y tornillos Allen M4x10.

Para la construcción del pedal de conexión con el robot, se utilizó el proceso de corte Laser, por la forma irregular de la pieza y por la presencia de cavidades internas. Una fotografía de la estación de carga ensamblada se muestra en la *Figura 103*.



Figura 103. Estructura ensamblada de la estación de carga.

4.3.2. Placa electrónica

La estación de carga, posee una placa electrónica de expansión para los GPIO del microcontrolador. También posee el circuito de carga de baterías compuesto por un puente rectificador de onda completa con sus borneras de conexión con el transformador 110V – 24V AC y con las placas de conexión con el robot móvil, en la *Figura 104* se muestra la placa electrónica construida.

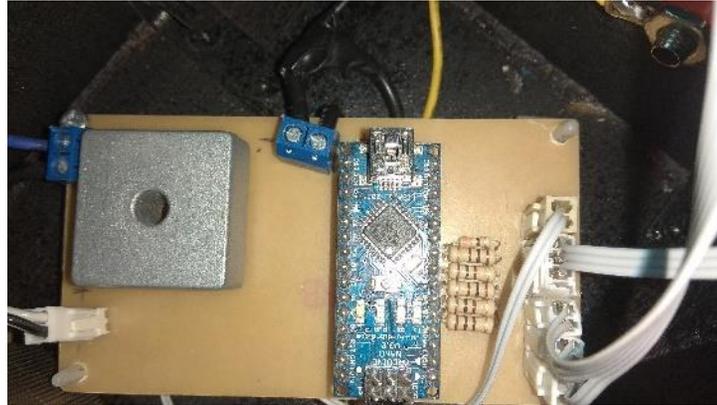


Figura 104. Placa electrónica de la estación de carga.

La placa electrónica también tiene su conexión con un switch principal de encendido y apagado de la estación de carga y un switch de 3 estados que permite la selección de 12V ó 24V para la carga de las baterías según sea el caso.

4.3.3. Placas de conexión

Las placas de la estación de carga que permiten la conexión con los pines de carga del robot fueron construidas con lámina de aluminio de 3mm.

Para su sujeción se utilizó tornillo M3 x 10 de cabeza avellanada que fue ensamblado a los componentes de soporte impresos en 3D, como lo muestra en la



Figura 105. Placas de conexión de carga.

La *Figura 106* presenta la diferencia entre la plataforma robótica móvil para interiores en su diseño previo y la plataforma propuesta en el trabajo.



Figura 106. Diferencia entre la plataforma móvil previa y la propuesta.

4.4. Control – Interfaz Humano Máquina

La plataforma robótica móvil para su funcionamiento tendrá un control por medio del cual el robot podrá ser teleoperado para la activación y desactivación de las funciones principales del robot. El HMI fue diseñado de manera amigable y entendible para el usuario (requerimiento de diseño en Tabla 1), su desarrollo fue realizado en el programa QT Designer con la inclusión del lenguaje Python y librerías de ROS. En la *Figura 107* se puede observar la ventana diseñada para el control de la plataforma robótica móvil.

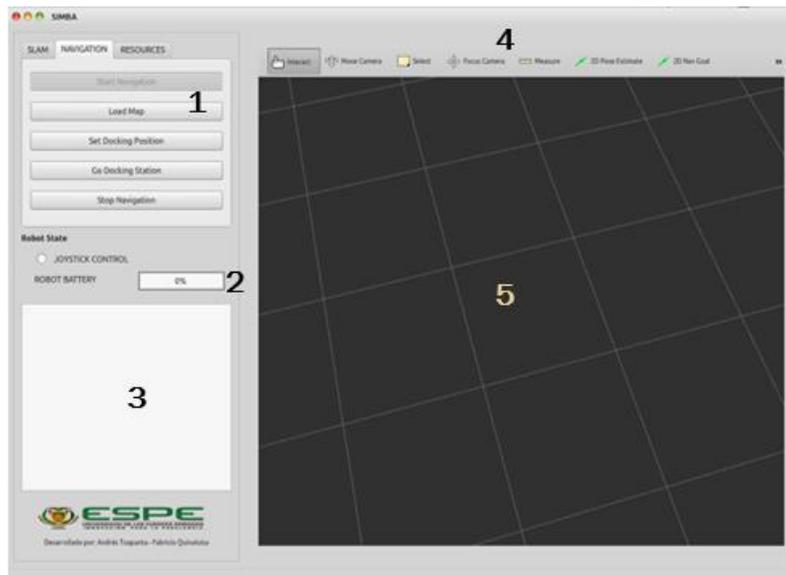


Figura 107. Interfaz Humano-Máquina de la plataforma robótica móvil SIMBA.

La interfaz cuenta con cinco principales partes con las que se puede manejar de manera correcta a la plataforma. La primera parte que se observa en la *Figura 107* constituye el mando principal del robot en la cual se muestran 3 paneles, en la *Figura 108* se puede observar los 3 paneles de navegación conteniendo las funciones de SLAM donde se encuentran todas las funciones de SLAM, Navegación con cada una de sus funciones para el movimiento del robot y Recursos en la cual se muestra

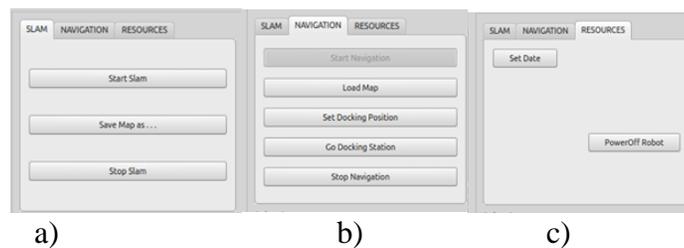


Figura 108. Panel principal de control.

Nota: a) Panel de SLAM b) Panel de Navegación c) Panel de Recursos.

La segunda parte es el indicador de baterías y activación y desactivación de teleoperación del robot por mando joystick. La tercera parte nos muestra mensajes o advertencias generadas por el

robot. La cuarta y quinta parte es el menú de navegación y la ventana de visualización de movimiento y generación de mapa del robot. En la *Figura 109* se puede observar el funcionamiento y visualización de la interfaz gráfica.

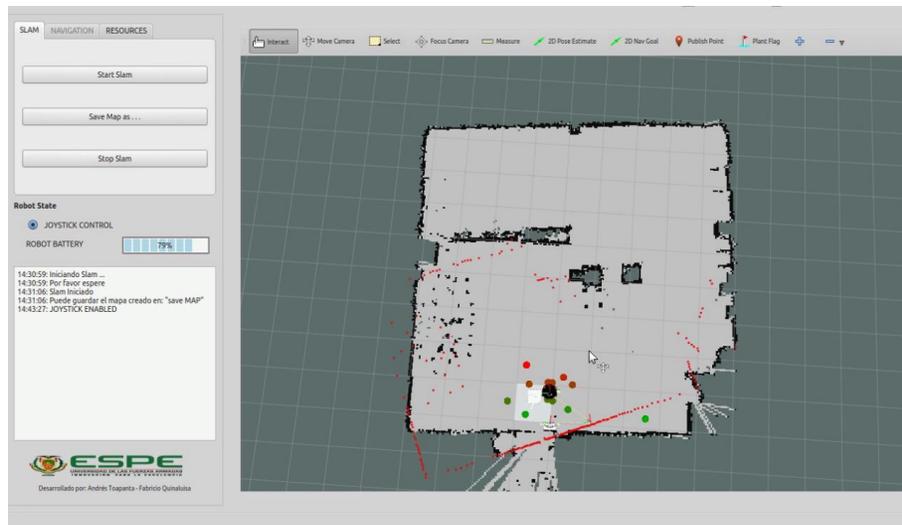


Figura 109. Funcionamiento y visualización de la interfaz.

4.5. Implementación de SLAM

La plataforma robótica móvil en su sistema autónomo es capaz de realizar localización y mapeo simultaneo, para la implementación del sistema SLAM se tendrá el uso de paquetes de ROS (Robot Operating System), mediante los cuales se efectuará la fusión de los elementos del robot con el sistema de control.

En la implementación se usará el método Gmapping el cual consiste en la fusión de la odometría de las ruedas del robot con el funcionamiento del sensor lidar fusionándolos para obtener el mapeo como se muestra en la *Figura 110*.



Figura 110. Método de SLAM -Gmapping.

El método de SLAM – Gmapping está basado en la utilización de un filtro de partículas el método de FastSLAM 2.0 mediante el cual genera el mapeo con la inclusión de los datos de odometría y sensor laser. En la *Figura 111* se puede observar el algoritmo de funcionamiento de SLAM Gmapping.

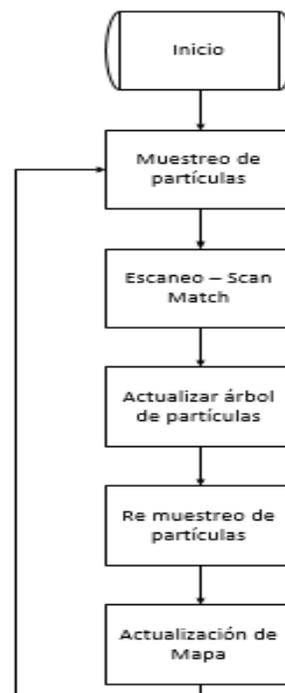


Figura 111. Algoritmo de funcionamiento del método Gmapping.

En cada una de las etapas del algoritmo del método gmapping se tiene una función particular. Los datos del sensor lidar son tomados en la etapa de muestreo de partículas donde se toman los

primeros datos lanzados para establecer el mapa para posteriormente en el escaneo ser mejorado los datos.

La odometría de las ruedas de la plataforma interviene en la etapa de actualización del árbol de partículas, en la cual el mapa actualiza su posición con respecto a su posición inicial tomando en cuenta la odometría del robot y la odometría propia generada por el algoritmo a través del sensor laser.

La plataforma robótica móvil tendrá utilizará la última versión de gmapping 1.3.10-0 la cual fue actualizada en enero del 2018 para la versión de ROS Kinetic.

4.6. Implementación Navegación

En la navegación de la plataforma robótica móvil haciendo uso del sistema operativo robótico ROS se procedió a utilizar el paquete de navegación NAVIGATION STACK como se detalla en su página web: <https://wiki.ros.org/navigation>

La navegación propuesta por el paquete de ROS está basada en dos componentes principales, que son: Planificación de trayectoria y navegación controlados por *move_base*.

4.6.1. Planificación de trayectoria

La plataforma robótica móvil, una vez obtenido y guardado el mapa del entorno, es capaz de movilizarse a cualquier punto de coordenadas (x, y) de dicho mapa, siempre y cuando el punto de meta o *Goal* no esté ocupado por algún obstáculo.

En ROS, los mapas están descritos por celdas de ocupación. Cada celda de color negro corresponde a un obstáculo en dicho mapa y cada celda de color blanco corresponde a un espacio vacío en el *Occupancy Grid*.

Así mismo hay lugares no mapeados, o sin información que corresponden a un color gris mostrados en el visualizador de ROS *Rviz*.

La planificación de trayectoria se la realiza entre dos puntos de coordenadas (x,y) y orientación (*yaw*). ROS plantea la posibilidad de obtener dichas coordenadas con el método gráfico en *Rviz* con solamente dar clic en un punto de celda desocupada presente en el mapa y especificar la orientación del vector en el mismo punto.

ROS plantea algoritmos de planificación de trayectoria para su planificador global, los cuales se enumeran a continuación:

- Algoritmo de Dijkstra o de caminos mínimos.
- Algoritmo de búsqueda A*.
- Algoritmo de planificación por campos potenciales.

Los algoritmos mencionados trabajan en base a planificación por celdas de ocupación, cuya trayectoria es trazada fuera de los obstáculos y optimizando el recorrido buscando la ruta más corta.

La ruta es publicada en un tópico de nombre `/navfn/plan` de tipo `/nav_msgs/Path`.

ROS implementa también la planificación de trayectoria cada cierta frecuencia de actualización, que permite obtener la ruta hacia la meta en ambientes dinámicos.

4.6.2. Navegación

El paquete de navegación de ROS está implementado utilizando el algoritmo de Enfoque de la Ventana Dinámica (DWA: Dynamic Window Approach).

El enfoque de la ventana dinámica determina la posibilidad de navegar en un entorno simulando posibles futuras instancias de velocidad - aceleración lineal y angular de un robot móvil.

El algoritmo simula posibles valores de velocidad y aceleración en el futuro, conocida la cinemática y dinámica del robot se descartan algunas posibilidades y se obtienen valores en los que el robot se acerca cada vez más hacia la meta y se aleja de los obstáculos en el menor tiempo posible.

La ventana dinámica tiene límites en función del tiempo de simulación y los límites de velocidad y aceleración del robot, tomando en cuenta la capacidad del robot de ejecutar el par (aceleración/velocidad) respecto a su sistema de locomoción, por lo que es ampliamente usado en robots con locomoción diferencial y omnidireccional.

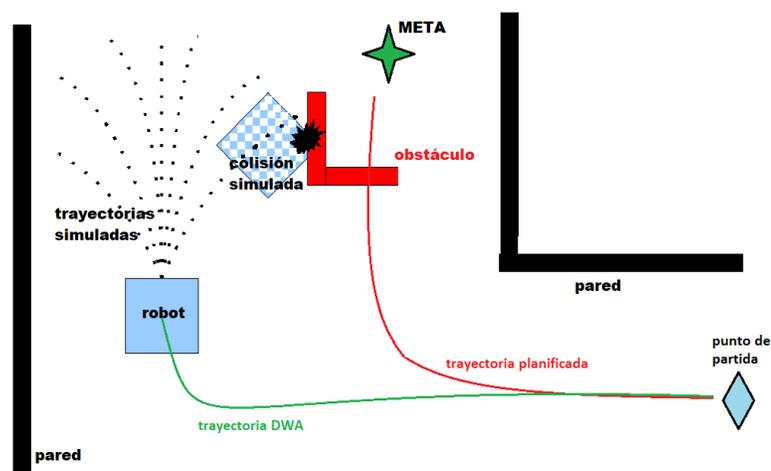


Figura 112. Representación de trayectorias simuladas en DWA local planner.

La *Figura 112* muestra las trayectorias simuladas dirigidas hacia la meta, haciendo uso del algoritmo DWA, se puede observar que las trayectorias son en su mayor parte curvas, siendo la trayectoria válida aquella que impulse al robot más cerca de la meta.

Cabe recalcar que el algoritmo DWA implementado en el paquete de navegación hace uso en primera instancia de la ruta global generada por el planificador global, posteriormente hace uso de DWA Local Planner para la navegación.

4.7. Pruebas y resultados.

A lo largo del rediseño y construcción de la plataforma robótica móvil para interiores en su implementación y funcionamiento se evalúa su funcionamiento en cada uno de sus etapas de construcción como de implementación. En las pruebas a implementar en la plataforma robótica móvil se tendrá la evaluación de todos los aspectos que conforman los objetivos del presente trabajo.

4.7.1. Prueba de movilidad y odometría

La primera evaluación consta de la movilidad que tiene la plataforma robótica en su movimiento y su odometría en el cumplimiento de trayectorias de formas simples tales como un cuadrado y un círculo.

La prueba se implementará una vez construido el módulo de estructura en todas sus etapas tanto en su forma mecánica y su parte electrónica y de control. Para cada una de las pruebas se tomará medidas para observar los posibles errores del robot.

Resultados

Para la observación de la movilidad y odometría del robot se plantean dos trayectorias con las cuales se puede observar de manera cualitativa y cuantitativamente el desempeño de la plataforma robótica móvil. En la *Figura 113* se observa la primera trayectoria planteada a cubrir el robot precisando el punto inicial de partida del robot donde sus coordenadas son $X=0$ y $Y=0$.

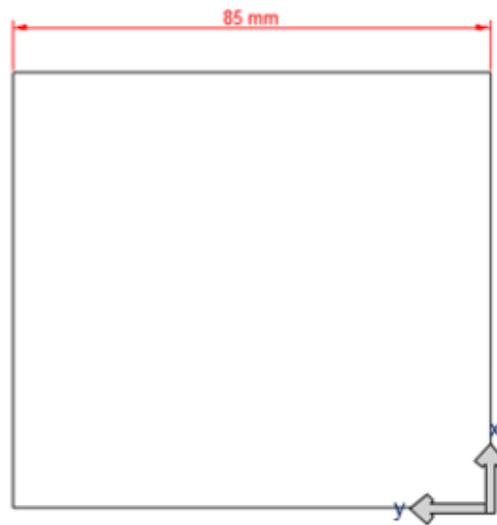


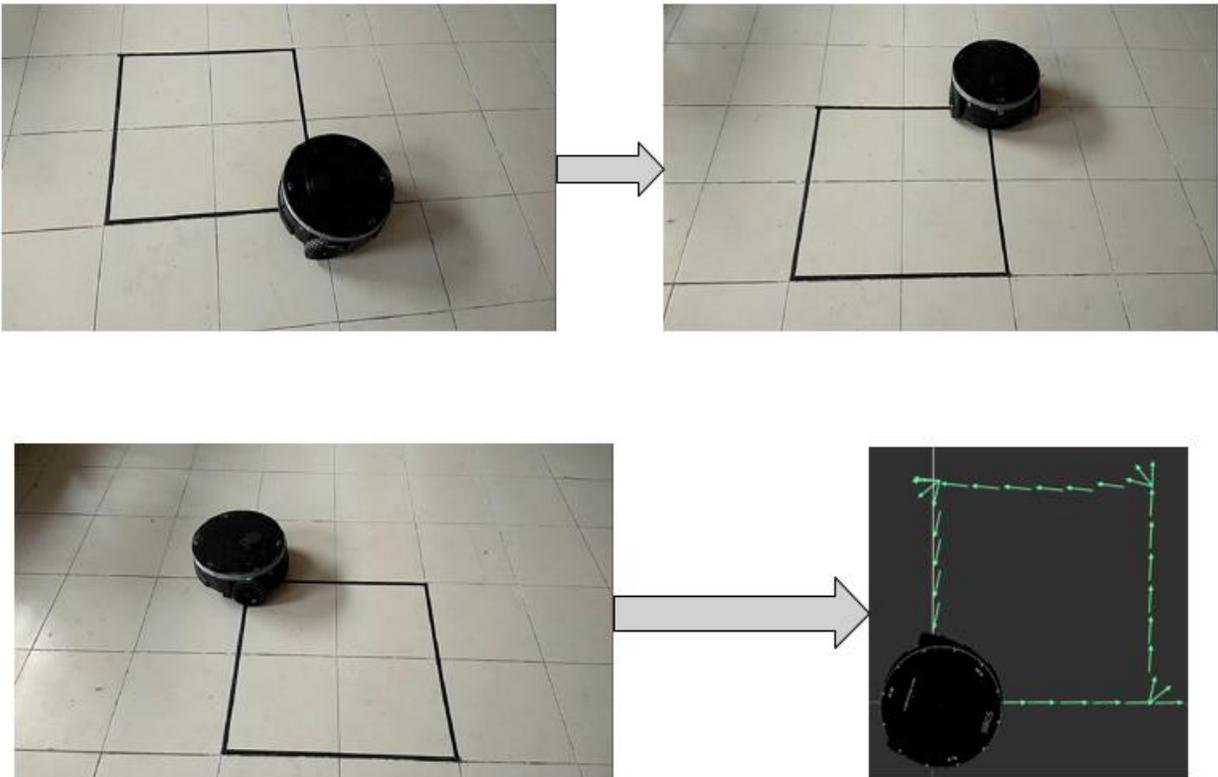
Figura 113. Trayectorias cuadrada - prueba de odometría.

Se ubica al robot en las coordenadas iniciales como se muestra en la *Figura 113*, el robot debe volver a la posición de inicio y se realiza 5 repeticiones con la misma trayectoria. El error se obtendrá con respecto a las coordenadas iniciales $X=0$ y $Y=0$.

Tabla 55*Resultados de odometría en trayectoria cuadrada.*

# Trayectorias	Error Absoluto	
	x (mm)	y (mm)
1	16	11
2	9	10
3	10	11
4	3	3
5	2	3

En la Tabla 55 se puede observar los resultados obtenidos del seguimiento del robot a través de la trayectoria cuadrada, los puntos mostrados en la Tabla 55 son los desfases con respecto a las coordenadas iniciales $X=0$ y $Y=0$, donde se observa que a partir de la cuarta trayectoria el robot tiene un error absoluto de aproximado 3 mm con respecto a cada eje.

**Figura 114.** Seguimiento de trayectoria Cuadrada.

En la *Figura 114* se puede observar el seguimiento de la plataforma robótica móvil a través de una trayectoria cuadrada, tanto en su parte física como observado a través de su respectivo HMI. La prueba en la trayectoria mostrada se la realizó con una velocidad lineal $v_x = 0,4 \frac{m}{s}$ para cada una de las repeticiones de la trayectoria.

Se realiza la siguiente prueba de odometría en una trayectoria circular, tal como se muestra en la *Figura 115* en la cual se observará el diámetro que realice la plataforma robótica móvil y se hará la comparación con el diámetro que se observe en el HMI de robot obteniendo el error con respecto a la recepción de datos.

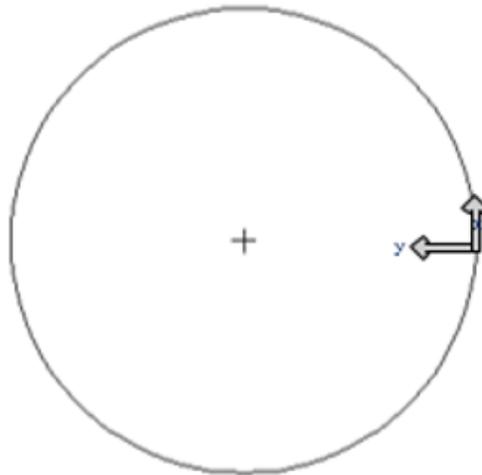
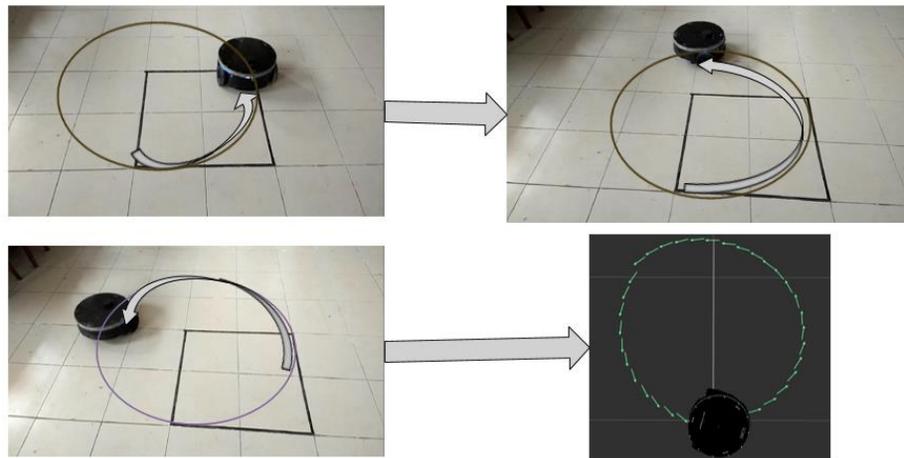


Figura 115. Trayectoria circular - prueba de odometría.

Se realizan varias pruebas sobre la trayectoria planteada en la cual se obtiene las respectivas mediciones las cuales los resultados se muestran en la Tabla 56. Los errores mostrados en la Tabla 56 del diámetro generado por la plataforma robótica móvil no excede al 2% del diámetro circular dibujado en el HMI con respecto al diámetro real generado.

Tabla 56*Resultados de odometría en trayectoria circular.*

Trayectoria Circular			
# Trayectorias	HMI (ϕ mm)	Medido (ϕ mm)	Error
1	1009	998	1,1%
2	1003	999	0,4%
3	1005	1003	0,2%
4	1002	1004	0,2%

**Figura 116.** Seguimiento de Trayectoria Circular

En la *Figura 116* se puede observar el seguimiento de la plataforma robótica móvil a través de una trayectoria circular, desarrollando la trayectoria en su parte física como observado a través de su respectivo HMI. La prueba en la trayectoria mostrada se la realizó con una velocidad lineal $v_x = 0.3 \frac{m}{s}$ y una velocidad angular de $\omega = 0.5 \frac{rad}{s}$ para cada una de las repeticiones de la trayectoria.

Dentro de la movilidad del robot se debe tomar en cuenta el uso energético del robot por lo que se realizó la toma de datos de corriente mientras el robot se encontraba en funcionamiento.

Tabla 57*Prueba energética de la plataforma en movimiento lineal.*

Velocidad Lineal [m/s]	Corriente [A]
0	0,41
0,06	1,7
0,07	2,06
0,08	2,13
0,23	5,32
0,46	4,9
0,69	4,2

Tabla 58*Prueba energética de la plataforma en movimiento angular.*

Velocidad angular [rad/s]	Corriente [A]
0,3	1,82
0,4	2,25
0,61	3
1,25	5,35
1,32	5,24
1,875	5,13

4.7.2. Pruebas de SLAM

La evaluación consta de la configuración de parámetros para la implementación de localización y mapeo simultaneo (SLAM). Se realizarán pruebas en dos entornos realizando la comparación de cada uno de los mapas obtenidos con respecto al lugar original, obteniendo el error del mapa real con el mapa obtenido.

La generación de SLAM se lo realizará en dos entornos en los cuales se ajustará los parámetros del paquete Gmapping de ROS utilizado para mapeo. Los dos entornos a evaluar son un local donde se tiene un espacio abierto y un departamento donde se tendrá más obstáculos que el primer entorno.

Se tendrán dos evaluaciones, en la primera evaluación se tendrán evaluaciones cuantitativas tales como tiempo, porcentaje de procesamiento y evaluaciones cualitativas como calidad de mapa y método de mapeo de la plataforma. La segunda evaluación será la comparación de medidas del mapa obtenido con respecto a los valores reales del entorno de mapeo, las dos evaluaciones se implementarán en los dos entornos mencionados.

Resultados

Se realizó cada uno de las pruebas en los entornos que se muestran en la *Figura 117* y en la *Figura 118*, donde se puede observar cada uno de los entornos de pruebas. Se puede observar además de ello la diferencia de presencia de obstáculos en cada uno de los entornos lo que permitió que se tenga una mejor configuración y calidad para la generación del SLAM.

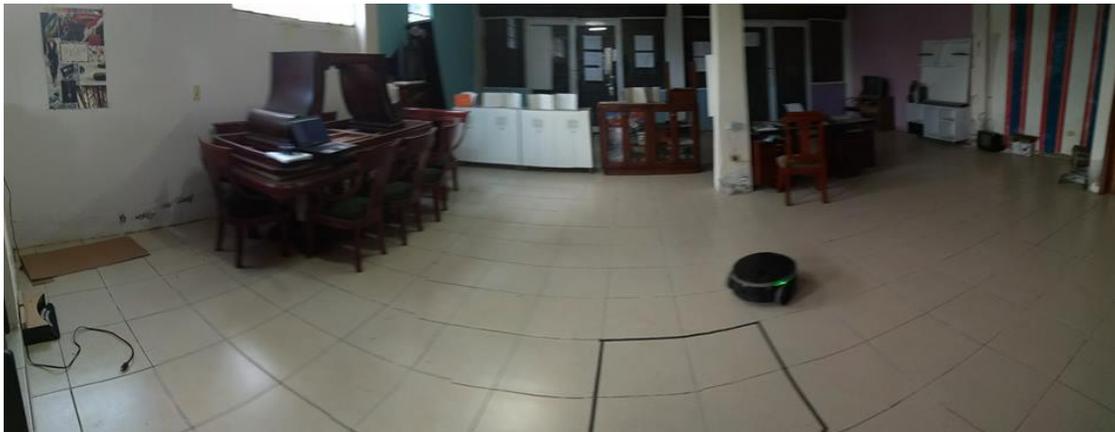


Figura 117. Entorno de prueba de mapeo - Local.



Figura 118. Entorno de prueba de mapeo - Departamento.

Una vez definido cada uno de los entornos se procedió a realizar el mapeo de cada uno de los entornos presentando los resultados sobre el entorno 1 en la Tabla 59 y los resultados del entorno 2 en la

Tabla 60.

Tabla 59

Resultados mapeo entorno 1 – Local

Entorno 1 – Local comercial				
Prueba	Tiempo de Mapeo (min)	CPU%	Calidad	Método
m1	3:30	31%	Baja	Giros bruscos
m2	2:38	34%	Baja	Pausado
m3	2:42	37%	Media	Pausado / 10m
m4	2:35	35%	Alta	Rápido continuo

Tabla 60

Resultados mapeo entorno 2 - Departamento.

Entorno 2 - Departamento				
Prueba	Tiempo de Mapeo (min)	CPU%	Calidad	Método
mc1	5:40	34%	Baja	Pausado
mc2	3:00	37%	Media	Rápido -Giros Bruscos
mc3	3:40	31,5%	Media	Giros Leves

mc4	3:37	30,5%	Alta	Rápido Continuo
-----	------	-------	------	-----------------

En los resultados mostrados para el entorno 1 y entorno 2, se puede observar que para la prueba número 4 en cada uno de los entornos, el mapa obtenido cumple con una calidad aceptable, al igual que el tiempo es el esperado en cada uno de los entornos.

Se muestra también que el procesamiento de la tarjeta principal al momento de realizar el SLAM no supera el 37% de toda su capacidad por lo que no se está sobre cargando en procesamiento al ordenador.

Se muestran los mapas obtenidos del entorno 1 – Local a partir de la *Figura 119* hasta la *Figura 122* , mostrando la calidad de cada uno de los mapas obtenidos con respecto a cada una de las pruebas evaluadas y mostradas en la *Tabla 59*.

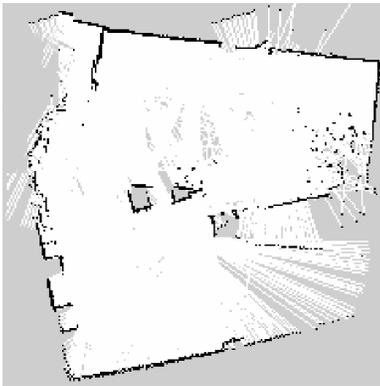


Figura 119. Mapeo m1 de entorno 2 -Local.

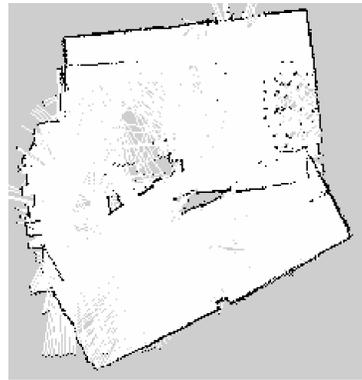


Figura 120. Mapeo m2 de entorno 2 -Local.

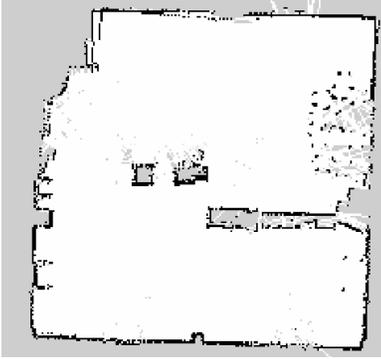


Figura 121. Mapeo m3 de entorno 2 -Local.

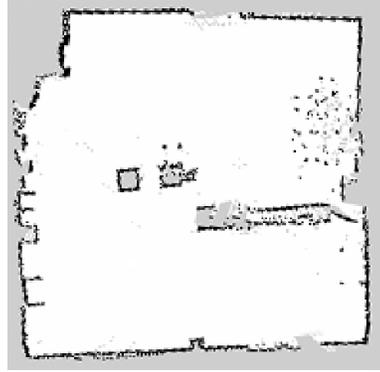


Figura 122. Mapeo m4 de entorno 2 -Local.

Se muestran los mapas obtenidos del entorno 2 – Departamento a partir de la *Figura 123* hasta la *Figura 126*, mostrando la calidad de cada uno de los mapas obtenidos con respecto a cada una de las pruebas evaluadas y mostrados en la

Tabla 60.



Figura 123. Mapeo mc1 de entorno 2 -Departamento.

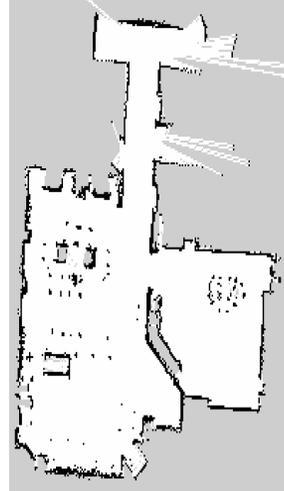


Figura 124. Mapeo mc2 de entorno 2 – Departamento.

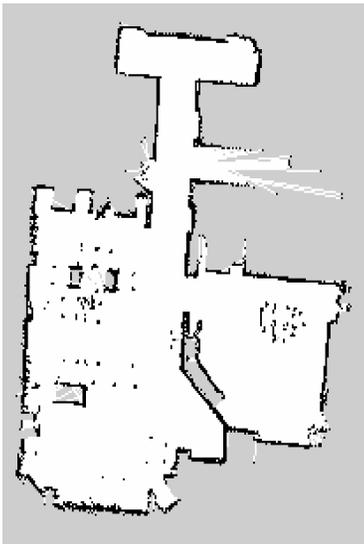


Figura 125. Mapeo mc3 de entorno 2 – Departamento.

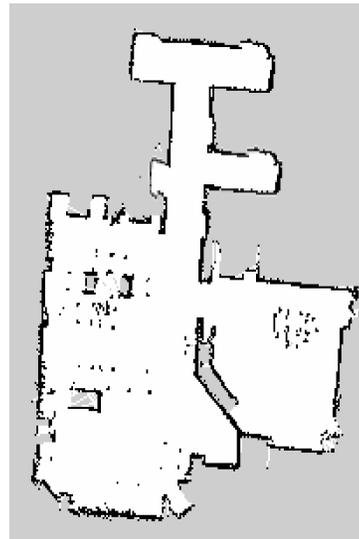


Figura 126. Mapeo mc4 de entorno 2 - Departamento.

La segunda evaluación con respecto a SLAM es la comparación con respecto a las de medidas del mapa generado y las medidas reales del entorno 1 y el entorno 2, con cada uno de los mapas obtenidos de cada entorno

La obtención de las medidas en los mapas se los realiza a través del HMI, el cual nos proporciona una herramienta para obtener la medida entre dos puntos, en la *Figura 127* y *Figura 128* se observan las principales medidas a obtener de cada uno de los mapas de cada entorno.

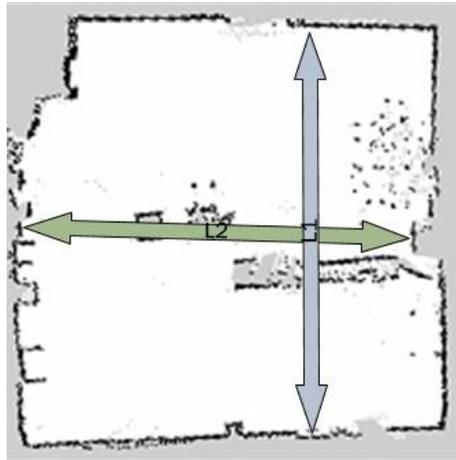


Figura 127. Principales medidas del entorno 1.



Figura 128. Principales medidas del entorno 2.

Los resultados se pueden observar en la Tabla 61 del entorno 1 y Tabla 62 del entorno 2, realizando la comparación con las medidas obtenidas a través del mapa y las medidas reales de los entornos evaluados.

Tabla 61

Resultados comparación de medidas entorno 1.

Entorno 1 - Local			
Lado	Distancia		Error %
	Real (m)	Medido (m)	
L1	9,055	8,98233	0,80%
L2	9,17	9,0483	1,33%

Tabla 62

Resultados comparación de medidas entorno 2.

Entorno 2 - Departamento			
Lado	Distancia		Error %
	Real (m)	Medido (m)	
L1	11,74	11,5095	1,96%
L2	4,50	4,44547	1,21%
L3	4,77	4,6	3,56%
L4	1,88	1,86979	0,54%

Se muestra que en los resultados el error obtenido del mapa generado a través del SLAM con respecto a las dimensiones reales de cada uno de los entornos no supera al 4% de las medidas obtenidas con respecto a las reales.

4.7.3. Prueba de posicionamiento en estación de carga

En la autonomía de la plataforma robótica móvil se diseñó su estación de carga eléctrica para la sustentación eléctrica del robot, por lo que uno de sus principales funciones es que el robot pueda posicionarse de manera autónoma en su estación de carga.

Para el funcionamiento el robot se debe encontrar en modo navegación por medio del control de la interfaz se da la orden al robot a ir a su posición de carga y posteriormente su anclaje a la estación.

Se realizaron dos pruebas las cuales la emisión y recepción de la señal de 38 KHz de los sensores infrarrojos y la segunda prueba es el posicionamiento del robot en la estación de carga tomando en cuenta el nivel de carga y el tiempo en acople a la estación de carga.

Resultados

Se realizó cada una de las pruebas para obtener la correcta interacción entre la estación de carga y la plataforma robótica móvil. La primera prueba se realizó con la comprobación de la señal modulada de 38 KHz de los sensores infrarrojos.

Se muestra la señal enviada por cada uno de los emisores la cuál forma la señal modulada a 38 KHz la cuál evitará la luz del medio ambiente. La señal completa se muestra con la superposición del pulso inicial y el pulso modulado de cada uno de los emisores. Las señales serán tomadas por la herramienta de osciloscopio que nos brinda la tarjeta Redpitaya.

En la *Figura 129*, *Figura 130* y *Figura 131* se muestra el pulso del emisor derecho, emisor central y emisor izquierdo respectivamente. Se muestra además la pausa a partir del pulso inicial hacia el pulso de cada emisor.

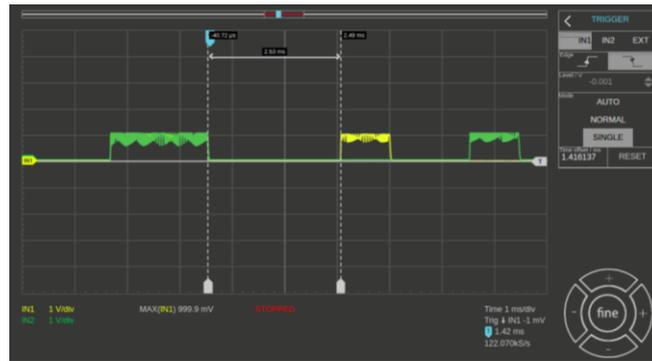


Figura 129. Onda modulada del primer emisor infrarrojo derecho.

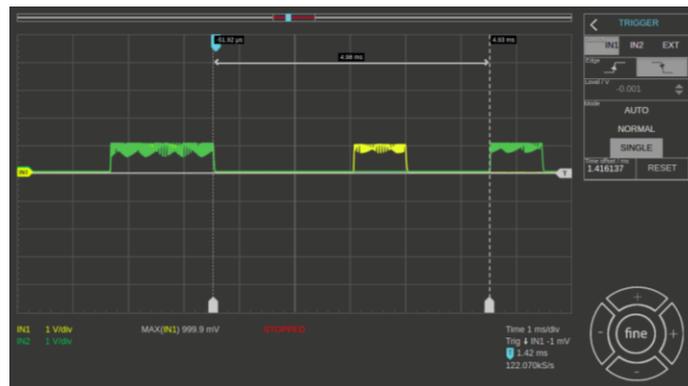


Figura 130. Onda modulada del segundo emisor infrarrojo central.

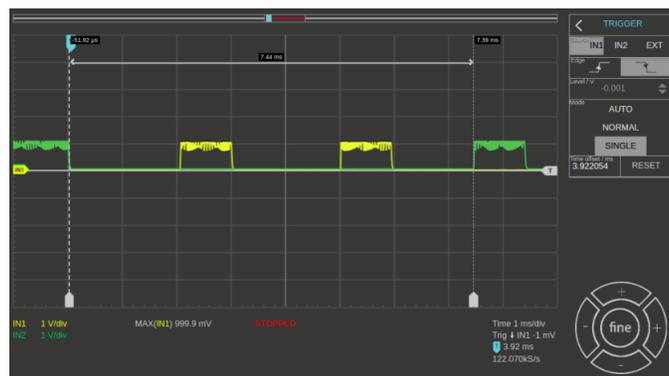


Figura 131. Onda modulada del tercer emisor infrarrojo izquierdo.

Una vez comprobada la señal emitida por cada uno de los emisores infrarrojos se procede a comprobar la frecuencia modulada de 38 KHz de cada pulso. En la *Figura 132* se muestran el periodo del pulso de la onda modulada con la que se puede comprobar la frecuencia real enviada.

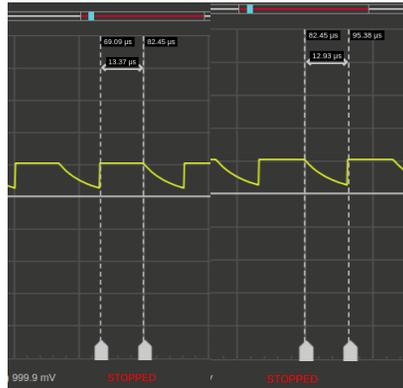


Figura 132. Periodo del pulso de la onda modulada.

La obtención de la frecuencia se la halla al tener el periodo total que es la suma de los periodos mostrados en la *Figura 132* con lo que podemos obtener la frecuencia real.

$$f = \frac{1}{2T} \quad (36)$$

$$f = \frac{1}{(13,37 + 12,93)\mu s} \quad (37)$$

$$f = 38,022 \text{ KHz} \quad (38)$$

Se muestra que la frecuencia real obtenida es la frecuencia deseada para el funcionamiento óptimo de los sensores infrarrojos, por lo que se procede a realizar la prueba de posicionamiento del robot en la estación de carga.

La segunda prueba de la estación de carga consta del posicionamiento en su estación de carga, tomando en cuenta el tiempo, la posición inicial y el posicionamiento final en la estación de carga. En la Tabla 63 se muestra los resultados de posicionamiento de la estación de carga.

Tabla 63*Resultados de posicionamiento de la estación de carga.*

Prueba	Tiempo [s]	Posición Inicial	Posición Final
1	40	Alineado	Regular
2	23	Alineado	Malo
3	24,7	Alineado	Bueno
4	58	Desalineado	Excelente
5	67	Desalineado	Excelente

En cada una de las pruebas el robot fue posicionado usando la navegación propia del robot, por lo que se define una trayectoria directa a la estación de carga y se ejecuta el algoritmo de posicionamiento con los sensores infrarrojos.

En la *Figura 133* se puede observar la posición inicial de las pruebas de posicionamiento de la plataforma robótica móvil, mientras que en la *Figura 134* se observa el anclaje final del robot a la estación de carga



Figura 133. Posición inicial de la plataforma robótica móvil.



Figura 134. Posición final de la plataforma robótica móvil.

4.7.4. Prueba de planificador de trayectorias

Haciendo uso de los paquetes de navegación en ROS, en la planificación de trayectorias se utilizó el paquete Global Planner ROS, ver en http://wiki.ros.org/global_planner.



Figura 135. Planeador global en ruta. a) Plan inicial b) Plan posterior.

En la *Figura 135* se observa la ruta trazada son un plano 2D, la ruta se crea automáticamente después de especificar un punto de navegación **2d Nav Goal**.

La ruta en principio toma una trayectoria alejada, debido a la existencia de un obstáculo en la ruta más corta, ver *Figura 135 a*.

Mientras el robot móvil va acercándose hacia la meta, la ruta es cambiada debido a que el obstáculo ya no está presente, por lo cual se ha corregido la planificación mientras ocurre la navegación, ver *Figura 135 b*.

La tasa de actualización de las rutas es un parámetro configurable dentro del planificador Global Planner ROS. En los anexos se especifican los datos de configuración que se ha utilizado.

4.7.5. Prueba de navegación reactiva

Haciendo uso del paquete de navegación de ROS, presente en el paquete *move_base* llamado *Base_Local_Planner* se han configurado los parámetros necesarios para la navegación reactiva. Los parámetros son requeridos para hacer uso del algoritmo DWA (Dynamic Window Approach) para la navegación local.

Son requeridas velocidades máximas y mínimas, aceleraciones, velocidades angulares máximas y mínimas. Cada una depende de la capacidad del robot en sus restricciones cinemáticas y dinámicas.

Los parámetros de velocidades máximas fueron tomados considerando la potencia de cálculo de la computadora central. En las pruebas iniciales se logró comprobar que a velocidades muy cercanas al límite máximo el robot tiende a acercarse mucho a los obstáculos e incluso colisionar. Dichas colisiones se deben a la alta demanda de actualización de datos que el algoritmo requiere a altas velocidades.

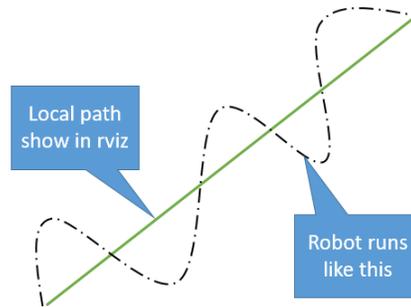


Figura 136. Trayectoria del robot móvil en navegación.
Fuente: (nguyen, 2016)

También a altas velocidades, el planeador local tiende a ejecutar movimientos muy alejados de la ruta planificada, como o muestra la *Figura 136*, por la baja actualización del controlador respecto a la velocidad del robot. En la Tabla 64 se muestran los resultados de navegación, especificado un punto de coordenadas (x, y, yaw) respecto al marco principal *map*.

Se observa la meta o *GOAL* la posición deseada especificada en un vector gráfico en *Rviz*, en la tabla se especifica la posición corregida por el filtro Kalman y el filtro de partículas con *MonteCarlo Localization*, el error absoluto presentado es menor a la tolerancia especificada en los parámetros de navegación *Base_Local_Planner*.

Tabla 64

Resultados de navegación de localización respecto a la meta establecida, con parámetros de tolerancia $x=0,15m$; $y=0,15m$.

N°	GOAL			AMCL			Error Absoluto AMCL		
	X [m]	Y [m]	yaw [°]	X [m]	Y [m]	yaw [°]	X [m]	Y [m]	yaw [°]
1	3,000	0,004	-2,000	2,860	-0,034	-2,180	0,140	0,038	0,180
2	0,990	0,000	0,250	0,970	0,010	-5,050	0,020	0,010	5,300
3	3,027	0,997	32,340	2,943	0,981	33,440	0,084	0,016	1,100
4	4,024	-0,986	-49,000	4,022	-0,865	-55,000	0,002	0,121	6,000

En la Tabla 65 se ha obtenido el error absoluto de navegación, dada una meta o *Goa* y la medición real de la posición del robot.

Tabla 65*Resultados de navegación de localización real respecto a la meta establecida.*

N°	GOAL			REAL			Error Absoluto P. Real		
	X [m]	Y [m]	yaw [°]	X [m]	Y [m]	yaw [°]	X [m]	Y [m]	yaw [°]
1	3,000	0,004	-2,000	2,870	0,030	-2,200	0,130	0,027	0,200
2	0,990	0,000	0,250	1,020	0,040	3,000	0,030	0,040	2,750
3	3,027	0,997	32,340	2,970	0,810	29,000	0,057	0,187	3,340
4	4,024	-0,986	-49,000	4,090	-1,080	-47,000	0,066	0,094	2,000

4.8. Resumen

La construcción del robot móvil SIMBA se realizó en base a los parámetros obtenidos en el capítulo 3. Los módulos son: 1) Estructura, 2) Módulo de sensores, 3) Aditamento de carga y 4) Estación de carga.

La estructura se construyó a base de corte en agua y soldadura de placa metálica de acero galvanizado, con pintura anticorrosiva y laca para protección a rayones. La estructura contiene a la computadora principal, motores NEMA 23, ruedas, drivers, bumpers, sensor giroscopio, pines de carga, baterías.

El módulo de sensores se fabricó mediante corte láser de acrílico, las piezas de soporte se fabricaron mediante impresión 3D. El módulo contiene a el anillo de sensores ultrasónicos, microcontrolador PIC 16F877A, sensor LIDAR.

Se construyó una estación de carga con base de madera MDF de 10mm. El contorno de la estación de carga se construyó con placa metálica de acero galvanizado y con pintura anticorrosiva color negro. La parte electrónica de la estación de carga esta compuesta por un transformador reductor 110V a 24V, un puente rectificador de onda completa montada sobre una placa

electrónica. La estación de carga también posee 3 emisores infrarrojos cuyo control se ejerce con un microcontrolador Arduino Nano.

Una vez que el robot SIMBA se encontró en funcionamiento pleno se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento para verificar el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo. Se realizó 5 pruebas generales donde se compró movilidad y odometría, SLAM, posicionamiento en la estación de carga, planeamiento de trayectoria y Navegación.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

El presente capítulo expone las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del trabajo realizado, presentando futuras investigaciones para un nuevo desarrollo sobre la plataforma robótica móvil.

5.1. Conclusiones

- Se rediseño y construyo la plataforma robótica móvil para interiores SIMBA, con una configuración diferencial en su movimiento y forma circular para su estructura. La plataforma posee un método de medición 2D basado en el funcionamiento de un sensor Láser omnidireccional 360° - Rplidar A1, sensores ultrasónicos, sensores infrarrojos.
- El control de todos los dispositivos está implementado en un computador Raspberry PI2 Model B a bordo del robot y un computador de estación Intel Core i5, 8GB RAM para la ejecución de SLAM, Navegación reactiva y auto posicionamiento en la estación de carga.
- El Software de control de la plataforma robótica móvil fue realizado en un sistema operativo basado en Linux, usando Ubuntu Mate 16.04. y se utilizó el framework ROS (Robot Operating System) versión Kinetic tanto en la computadora abordo como en la computadora de estación en configuración maestro esclavo por medio de una red inalámbrica WIFI.

- La plataforma robótica móvil diseñada es capaz de navegar en entornos de interiores gracias a su reducido tamaño de 398mm × 396mm × 500mm que le permite navegar por pasillos e ingresar por puertas. El robot es capaz de realizar trayectorias rectas y curvas gracias al control digital realizado sobre los motores a pasos Nema 23 permitiendo una máxima velocidad de la plataforma robótica móvil de 0,69m/s y velocidad angular máxima de 2 rad/s y presenta una odometría con error máximo de 16mm de posición y en trayectorias curvas de 1,1%. El robot móvil es capaz de cargar 5kg en su aditamento de carga prestándose como un robot de servicios para transporte de objetos de un lugar a otro con un consumo de corriente de 6,32A a plena carga.
- La localización del robot está basada en una fusión de una unidad de medición inercial IMU más la odometría propia del robot mediante el uso del filtro Kalman Extendido existente en el paquete RobotLocalizationROS. El filtro Kalman reduce la incertidumbre de la posición y orientación del robot en el plano con un error en trayectoria lineal de máximo 16 mm y en trayectoria circular de 1,1%.
- La plataforma robótica móvil es capaz de realizar SLAM con una calidad Alta mediante el método FastSlam 2.0 presente en el paquete Gmapping ROS. La velocidad óptima de mapeo es de 0,17m/s la cual es controlada por un mando Joystick inalámbrico. Los mapas obtenidos en las pruebas tienen un error máximo de 3,56% con respecto a las dimensiones reales.
- La planeación de trayectoria se la realiza usando el paquete Global planner ROS, que nos permite una planificación continua en ruta con una tasa de actualización de 2 Hz para la búsqueda de trayectorias en ambientes dinámicos. La plataforma robótica móvil

hace uso del algoritmo DWA (Dynamic Window Approach) presente en el paquete ROS Navigation que establece comandos de aceleración, velocidad lineal y angular para la evasión de obstáculos estáticos y dinámicos en la navegación.

- Se diseñó y construyó una estación de carga de dimensiones 334mm × 171mm × 159mm para el robot móvil con capacidad de carga de baterías de 12V y 24V a 10A. Para asistir en el anclaje automático se diseñó un sistema basado en 4 sensores infrarrojos emisores y receptores distribuidos en las posiciones lateral izquierdo – derecho y central.
- La plataforma robótica móvil puede auto posicionarse a una distancia de 1m delante de la estación de carga y anclarse mediante el arreglo de sensores infrarrojos y un algoritmo de control. El tiempo máximo de anclaje es de 67 segundos.
- Las características de la plataforma robótica móvil desarrollada respecto a su antecesor mejora la calidad de mapas creados en ambientes reales, implementa la navegación reactiva autónoma desde un punto inicial hacia una meta e implementa la carga automática de baterías.
- La plataforma robótica construida es útil para servicio de transporte de objetos de un lugar a otro de manera automática. También es útil para el levantamiento de mapas en entornos de interiores.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- En las pruebas de algoritmos de SLAM se analizaron los paquetes *Hector Mapping* y *Gmapping*. Se recomienda analizar el paquete *Google Cartographer ROS* que permite

crear mapas 2D y 3D y también el paquete *Karto Slam ROS* que pueden ser probados en el robot Simba sin ningún cambio de Hardware.

- Se recomienda realizar pruebas del paquete de navegación *Teb_Local_Planner ROS* para la navegación reactiva, que promete una mejora en el controlador de la locomoción y en funciones de estacionamiento a lugares estrechos.
- La robustez en la navegación de entornos se puede mejorar añadiendo sensores Láser para evitar obstáculos pequeños de altura menor a 20 cm, los cuales no pueden ser detectados por el sensor Lidar. En la navegación se detectaron problemas en navegar cuando existen cables sobre el piso, objetos pequeños, etc.
- La localización en la navegación es dependiente de la ubicación de la estación de carga, si el robot es llevado sin la navegación se presenta el problema del Robot Raptado o *Kidnapped Robot Problem*. Se recomienda la implementación de un algoritmo de recuperación de la posición para mejorar las características de desempeño en la navegación.
- Se recomienda la implementación de reloj con protocolo de comunicación I2C en la computadora a bordo Raspberry PI2 para evitar la pérdida de sincronización de fecha y hora.

Bibliografía

Adamides, G. (2013). *Agricultural Robot Sprayer and Evaluation of User Interfaces in Field Experiments*. Agricultural Research Institute.

Arrue Ullés, B. c. (2016). *Análisis de algoritmos para localización y mapeado simultáneo de objetos*. Sevilla: Escuela técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.

Bailey, H. (2006). *SLAM and Navigation with Pioneer 3-AT*. Robotics Automation Magazine.

Bräunl, T. (1998). *Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embedded Systems*. Springer.

Brock, O., & Khatib, O. (1999). High Speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach . *IEEE*.

Brooks, R. A. (n.d.). *Prospects for Human Level Intelligence for Humanoid Robots*. USA: MIT Artificial Intelligence Laboratory.

Chen, Y., Wu, F., Shuai, W., & Chen, X. (2017). Robots serve humans in public places KeJia robot as shopping assistant. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.

Cordoba L, J. P., & Mejía L , A. (2004). *Diseño y construcción de un anillo de sensores ultrasónicos para el levantamiento de Mapas de entorno y generación de trayectorias*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Cox, I. J., & Wilfong, G. T. (1990). *Autonomous Robot Vehicles*. New York: Springer-Verlag.

Elfes, A. (1987). *Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation*.

- Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. (1998). The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.
- Galindo , C., & Ruiz- Sarmiento, J. R. (2010). *Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect*. Málaga - España: Universidad de Málaga.
- Gallardo Andrade, J., & Gaona Román , A. D. (2015). *Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.
- Gallardo López, D. (1999). *Aplicación del muestreo bayesiano en robots móviles: estrategias para localización y estimación de mapas del entorno*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Garzón Jaramillo, P. M., & Obando Maldonado, C. A. (2016). *Desarrollo de un sistema de Ubicación en la plataforma robótica para exteriores teleoperada*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Gómez Gómez , D. H. (2015). *Desarrollo de una técnica SLAM para ambientes dinámicos tridimensionales*. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia.
- Hagras, H. A. (2004). A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots. IEEE.
- Han, W.-G., Baek, S.-M., & Kuc, T.-Y. (1997). Genetic Algorithm Based Path Planning and Dynamic Obstacle Avoidance of Mobile Robots. IEEE.
- Holland, J. M. (2004). *Designing Autonomous Mobile Robots: Inside the mind of an Intelligent Machine*. New York: ELSEVIER.

Iralab. (n.d.). *Iralab*. Retrieved from http://irawiki.disco.unimib.it/irawiki/index.php/ROS_GMapping

Jiechao, L., Paramsothuy, J., Jeffrey, S., & Tulga, E. (2014). A Multi-Stage Optimization Formulation for MPC-Based Obstacle Avoidance in Autonomous Vehicles Using a LIDAR Sensor.

Knepper, R., Srinivasa, S., & Mason, M. (2010). An Equivalence Relation for Local Path Sets.

KUKA, P. m. (2017). *KUKA ROBOTS*. Retrieved from <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/movilidad/plataformas-móviles/kmp-1500>.

LaValle, S. (1998). *Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning*. Iowa .

Lazea. (2001). *Aspects on path planning for mobile robots*. Reporte interno de la Technical University of Cluj-Napoca.

Mangas, J. D. (2007). *Evaluación y Prueba del Algoritmo FastSLAM de Construcción de Mapas para un Robot móvil*. Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Marín Paniagua, L. (2011). *Navegació de un robot móvil de configuración diferencial basada en Fusión Sensorial*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Martínez, S., & Sisto, R. (2009). *Campos potenciales*. Montevideo.

Mattamala Aravena, M. (2013). *Filtro de Kalman extendido con el robot khepera*. Chile: Universidad de Chile.

Microsoft. (n.d.). *Kinect para Windows*. Retrieved from <https://developer.microsoft.com/es-es/windows/kinect>

- Muñoz Martínez, V. F. (1999). *Navegación en Robots móviles*. Málaga.
- Nakkaya. (2009). *nakkaya*. Retrieved from <https://nakkaya.com/2011/10/27/path-finding-using-rapidly-exploring-random-tree/>
- nguyen. (2016, 12 21). Retrieved from <https://answers.ros.org/question/250296/navigation-stack-strange-angular-velocity/>
- Nilsson, N. J. (1969). *A MOBILE AUTOMATION: AN APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES*. California: Standord Research Institute.
- Oriolo, G., Ulivi, G., & Venditelli, M. (1998). *Real-Time Map Building and Navigation for Autonomous Robots in Unknown Environments*.
- Ortiz, A. (2014). *Navegación para robots móviles*. Palma de Mallorca.
- Oxford, U. (2014). *Dictionary*. Oxford University.
- Pereira Ruíz, S. (2016). *Localización de robots mediante filtro de Kalman*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Quishpe, W., Salas, A., Gordillo, R., & Altamirano, D. (2013). *Teleoperación PLataforma Móvil Irobot Create*. *Maskay*.
- Rodríguez , C. A. (2017). *Localización y mapeo simultáneo de objetos usando ROS*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Rodríguez Moya , Á. (2009). *Estudio del filtro de partículas aplicado al seguimiento de objetos en secuencias de imágenes*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid .

- Rosheim, M. (1994). *Robot Evolution, The development of Anthrobotics*. Toronto.
- Ruiz Sarmiento, J. R., Galindo, C., Gonzalez Jimenez, J., & Blanco, J. L. (2011). *Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect*. Malaga-España: Universidad de Málaga.
- Ruiz, J., Galindo, C., Gonzalez, J., & Blanco, J. (2011). Navegación Reactiva de un Robot Móvil usando Kinect.
- Saltarén Pazmiño, R. J., Azorín Poveda, J. M., Almonacid Kroeger, M., & Sabater Navarro, J. M. (2013). *Prácticas de robótica utilizando Matlab*. Alicante: NBIO.
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Massachusetts Institute of Technology.
- SLAMTEC. (n.d.). *slamtec.com*. Retrieved from slamtec.com
- Swarm Robot. (n.d.). *Swarm Robot*. Retrieved from <http://www.swarmrobot.org/PowerDockingStation.html>
- Takeuchi, T., Nagai, Y., & Enomoto, N. (1998). *Fuzzy Control of a Mobile Robot for Obstacle Avoidance*. Tokyo, Japan.
- Tian, L., & Collins, C. (2003). An Effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- Universidad de Santiago de Chile. (n.d.). *Universidad de Santiago Virtual*. Retrieved from UdeSantiagoVirtual: <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/course/view.php?id=4>

Urdiales García, C. (2006). *Introducción a la robótica*. Málaga: Universidad de Málaga.

Vallés Miquel, M., & Valera Fernández, Á. (2014). *Localización de robots móviles de recursos limitados basada en fusión sensorial por eventos*. Valencia: Universidad politécnica de Valencia.

Vera Durán, J. (2016). *Sistema de recargar de energía de robots móviles con ROS*. Málaga: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial - Universidad de Málaga.

YellowScan. (2004). *LiDAR 3D mapping can penetrate vegetation*. YellowScan.

Anexos

ANEXO A

MANUAL DE USUARIO

ANEXO B

PLANOS MECÁNICOS

ANEXO C

PLANOS ELÉCTRICOS

ANEXO D

DIAGRAMA DE FLUJO POSICIONAMIENTO ESTACIÓN DE CARGA.