



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL PARA
SLAM CON RECUPERACIÓN DE UBICACIÓN EN EL CASO DE RAPTO**

AUTOR: CARRERA CEPEDA, ALEXIS GABRIEL

DIRECTOR: DR. AGUILAR CASTILLO, WILBERT GEOVANNY

SANGOLQUÍ

2018



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL PARA SLAM CON RECUPERACIÓN DE UBICACIÓN EN EL CASO DE RAPTO**” fue realizado por el señor **Carrera Cepeda, Alexis Gabriel** 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, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de mayo del 2018

Firma:

DR. WILBERT G. AGUILAR

C.C. 0703844696



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Carrera Cepeda, Alexis Gabriel, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL PARA SLAM CON RECUPERACIÓN DE UBICACIÓN EN EL CASO DE RAPTO”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de mayo del 2018

Firma

ALEXIS GABRIEL CARRERA CEPEDA

CC. 1720168291



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

AUTORIZACIÓN

Yo, Carrera Cepeda, Alexis Gabriel autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL PARA SLAM CON RECUPERACIÓN DE UBICACIÓN EN EL CASO DE RAPTO**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de mayo del 2018

Firma

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Alexis Carrera Cepeda', is written over a horizontal dotted line.

ALEXIS GABRIEL CARRERA CEPEDA

CC. 1720168291

DEDICATORIA

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

A mi hermano, Andrés, que formó parte de este trayecto.

A mis amigos quienes siempre me apoyaron, corrigieron e incluso enseñaron lo que necesitaba para culminar esta etapa y compartimos momentos inolvidables con ellos.

Alexis Carrera

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, porque ha sabido guiarme por el camino correcto, dándome sabiduría y conocimiento a lo largo de esta etapa de mi vida, para servir a la sociedad con mis conocimientos.

A mis padres y hermano, por su paciencia y amor incondicional, me enseñaron que debo luchar por lo que se desea alcanzar.

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 Dr. Wilbert G. Aguilar quien supo guiarme para la culminación de este objetivo, y a mi director de carrera MSc. David Loza por guiarme en mi crecimiento académico.

Por último, agradecer a mis amigos por siempre apoyarme en todos mis objetivos planteados, y que con sus conocimientos, sabidurías y experiencias me guiaron para culminar esta etapa de mi vida.

Alexis Carrera

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación e importancia.....	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos.....	6
1.5. Alcance.....	7
1.6. Estructura del documento.....	8
CAPÍTULO II	9
ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Robótica Móvil.....	9
2.1.1. Historia de la robótica móvil.....	9
2.1.2. Clasificación de los robots móviles	10
2.1.3. Sistemas de locomoción de robots móviles de ruedas (RMR)	14

	iv
2.2. Navegación.....	20
2.2.1. Concepto de misión, navegación y operación.....	20
2.2.2. Navegación en robótica móvil	21
2.3. Percepción	22
2.3.1. Sensores	23
2.4. Localización	30
2.4.1. Localización Local.....	30
2.4.2. Localización Global	36
2.4.3. Métodos probabilísticos de corrección de Localización	37
2.5. Control de Movimiento	44
2.5.1. Motores DC.....	44
2.5.2. Motores a Pasos	45
2.6. Mapeo y Localización Simultáneo (SLAM)	46
2.7. Recuperación de la Ubicación del robot.....	48
2.7.1. Localización de Monte Carlo (MCL).....	49
2.7.2. Adaptación de Localización de Monte Carlo (AMCL)	50
2.7.3. Método del re muestreo (KDL-Sampling).....	52
2.8. Resumen	53
CAPÍTULO III	55
METODOLOGÍA Y DISEÑO	55
3.1. Definición de Necesidades	55
3.2. Definición de las características técnicas	56
3.3. Definición de la estructura funcional	58
3.3.1. Subsistema 1: Fuente Energética	60
3.3.2. Subsistema 2: Soporte y Locomoción.....	61

3.3.3.	Subsistema 3: Tracción	61
3.3.4.	Subsistema 4: Medición de Entorno	61
3.3.5.	Subsistema 5: Software y Controlador	61
3.3.6.	Subsistema 6: SLAM	62
3.3.7.	Subsistema 7: Recuperación de la ubicación	62
3.4.	Evaluación y selección de alternativas.....	62
3.4.1.	Subsistema 1: Fuente Energética	62
3.4.2.	Subsistema 2: Soporte y Locomoción.....	66
3.4.3.	Subsistema 3: Tracción	71
3.4.4.	Subsistema 4: Medición de Entorno	75
3.4.5.	Subsistema 5: Software y Controlador	80
3.4.6.	Subsistema 6: SLAM	87
3.4.7.	Subsistema 7: Recuperación de la ubicación	89
3.5.	Concepto final	93
3.6.	Módulo de Estructura y Movimiento	93
3.6.1.	Diseño Mecánico	94
3.6.2.	Diseño Electrónico.....	112
3.6.3.	Diseño del Sistema de Control.....	118
3.6.4.	Diseño Final	119
3.7.	Módulo de Medición del Entorno	121
3.7.1.	Diseño Mecánico	121
3.7.2.	Diseño Electrónico.....	124
3.7.3.	Diseño Final	126
3.8.	Módulo de Funciones del Robot	127
3.8.1.	Héctor SLAM.....	127

3.8.2. MCL con KDL-Sampling	128
3.9. Resumen	130
CAPÍTULO IV	132
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	132
4.1. Estructura y movimiento.....	132
4.1.1. Corte en agua de la Base y Doblado del Contorno.....	132
4.1.2. Soldadura de la estructura.....	134
4.1.3. Maquinado de ejes de cajas de reducción.....	135
4.1.4. Corte laser de engranajes y paredes de cajas de reducción	136
4.1.5. Pintura de la estructura	138
4.1.6. Ensamble de cajas de reducción en Base del Robot	138
4.1.7. Construcción del Circuito de Control	138
4.2. Medición del Entorno	140
4.2.1. Corte laser de Tapa	140
4.2.2. Impresión 3D de soportes de tapa.....	141
4.2.3. Construcción de Cable para conexión Lidar.....	142
4.2.4. Ensamble de Sensor con elementos.....	143
4.3. Funciones del Robot	143
4.3.1. Interfaz SLAM.....	143
4.3.2. Interfaz Recuperación de la Ubicación.....	144
4.3.3. Creación Lanzadores	145
4.4. Pruebas y Resultados	146
4.4.1. Primera Prueba.....	146
4.4.2. Segunda Prueba	151
4.5. Resumen	153

	vii
CAPÍTULO V	155
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	155
5.1. Conclusiones.....	155
5.2. Recomendaciones.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....	158
ANEXOS.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Proceso de Navegación</i>	22
Tabla 2 <i>Comparación de Métodos de Localización Global</i>	37
Tabla 3 <i>Lista de ventajas y desventajas de las diferentes estrategias de SLAM</i>	47
Tabla 4 <i>Tabla de Necesidades de la plataforma robótica móvil</i>	56
Tabla 5 <i>Características técnicas del producto</i>	57
Tabla 6 <i>Subsistemas de Plataforma Móvil</i>	60
Tabla 7 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 1</i>	63
Tabla 8 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Peso y Tamaño</i>	64
Tabla 9 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo</i>	65
Tabla 10 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Mercado</i>	65
Tabla 11 <i>Selección de concepto de Fuente Energética</i>	65
Tabla 12 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 2</i>	66
Tabla 13 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Peso y Tamaño</i>	69
Tabla 14 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo</i>	69
Tabla 15 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Estabilidad</i>	69
Tabla 16 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Robustez</i>	70
Tabla 17 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Movilidad</i>	70
Tabla 18 <i>Selección de concepto de Soporte y Locomoción</i>	70
Tabla 19 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 3</i>	71
Tabla 20 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Potencia</i>	73
Tabla 21 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo</i>	73
Tabla 22 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Control Posición</i>	74
Tabla 23 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Circuito P/C</i>	74
Tabla 24 <i>Selección de concepto de Tracción</i>	74
Tabla 25 <i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 4</i>	75
Tabla 26 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Comunicación</i>	78
Tabla 27 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Precisión y Exactitud</i>	78
Tabla 28 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo</i>	78
Tabla 29 <i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Soporte</i>	79

Tabla 30	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Datos</i>	79
Tabla 31	<i>Selección de concepto de Medición de Entorno</i>	79
Tabla 32	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 5</i>	81
Tabla 33	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo</i>	84
Tabla 34	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Uso</i>	84
Tabla 35	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Soporte</i>	85
Tabla 36	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Documentación</i>	85
Tabla 37	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento</i>	86
Tabla 38	<i>Selección de concepto de Software y Controlador</i>	86
Tabla 39	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 6</i>	87
Tabla 40	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento</i>	88
Tabla 41	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Facilidad</i>	88
Tabla 42	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Requerimientos</i>	89
Tabla 43	<i>Selección de concepto de SLAM</i>	89
Tabla 44	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 7</i>	90
Tabla 45	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento</i>	91
Tabla 46	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Facilidad</i>	91
Tabla 47	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Tiempo de Respuesta</i>	92
Tabla 48	<i>Ponderación de las alternativas con el criterio de Exactitud y Precisión</i>	92
Tabla 49	<i>Selección de concepto de Recuperación de la Ubicación</i>	93
Tabla 50	<i>Módulos de la Plataforma Robótica móvil para interiores.</i>	94
Tabla 51	<i>Pesos de Elementos.</i>	109
Tabla 52	<i>Factores para análisis CAE.</i>	110
Tabla 53	<i>Potencia de cada elemento</i>	113
Tabla 54	<i>Corrientes de elementos</i>	114
Tabla 55	<i>Características Técnicas de Driver A4988.</i>	115
Tabla 56	<i>Características Técnicas Raspberry Pi 2 Model B.</i>	117
Tabla 57	<i>Factores para análisis CAE de Tapa.</i>	122
Tabla 58	<i>Características Técnicas de Rplidar A1M8.</i>	125
Tabla 59	<i>Error de SLAM</i>	148
Tabla 60	<i>Tabla de Error de posición</i>	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Plataforma robótica móvil de interiores	3
Figura 2 Plataforma de Exteriores	4
Figura 3 Robot Móvil Terrestre.....	11
Figura 4 Robot Móvil Aéreo	12
Figura 5 Robot Móvil Acuático.....	12
Figura 6 Robot Móvil con patas Genghis.....	13
Figura 7 Robot Móvil tipo oruga.....	14
Figura 8 CIR generado por el cambio de dirección de las ruedas delanteras	15
Figura 9 Configuración tipo triciclo	16
Figura 10 Configuración Skid-Steer.....	17
Figura 11 Configuración Diferencial.....	17
Figura 12 Configuración Síncrona de tres ruedas directrices.....	18
Figura 13 Rueda Omnidireccional.....	19
Figura 14 Diagrama de configuración omnidireccional	20
Figura 15 Esquema básico de control de misión	21
Figura 16 Principio de funcionamiento de un Sonar	24
Figura 17 Anillo de sonares.....	24
Figura 18 Incertidumbre angular	25
Figura 19 Errores de falsos ecos.....	26
Figura 20 Sensor Kinect	26
Figura 21 Diagrama de Bloques Kinect	27
Figura 22 Lidar Funcionamiento	28
Figura 23 Rplidar de RobotShop.....	29
Figura 24 Escaneo 2D.....	29
Figura 25 Cinemática de Skid-Steer.....	31
Figura 26 Odometría de un robot con desplazamiento diferencial.....	36
Figura 27 Algoritmo de Filtro de Kalman	41
Figura 28 Motor DC	45
Figura 29 Motor a Pasos	45

Figura 30 Desarrollo del proceso de localización y mapeo simultaneo	47
Figura 31 Descripción general del sistema de mapeo y navegación	48
Figura 32 Ejemplo de Funcionamiento de Monte Carlo	51
Figura 33 Estructura Funcional	58
Figura 34 Sistema conjunto de Estructura Funcional	59
Figura 35 Subsistemas de Plataforma Móvil	59
Figura 36 Batería con ácido.....	64
Figura 37 Batería tipo Lipo	64
Figura 38 Locomoción Diferencial 2 Ruedas Motrices.....	67
Figura 39 Locomoción Skid-Steer.....	68
Figura 40 Locomoción Omnidireccional.....	68
Figura 41 Motor DC	72
Figura 42 Motor a Pasos	73
Figura 43 Anillo de Sonares	76
Figura 44 Kinect	77
Figura 45 Rplidar A1M8	77
Figura 46 Rasberry Pi 2 Model B con Ubuntu Mate y Ros Kinetic	82
Figura 47 Raspberry Pi 2 Model B con Raspbian y Ros Kinetic	82
Figura 48 Odroid XU4.....	83
Figura 49 NUC con Ubuntu Mate y Ros Kinetic	83
Figura 50 Motor paso a paso NEMA 17.....	97
Figura 51 Ruedas para Robot	98
Figura 52 Curva Torque-Velocidad de Motor Nema 17	99
Figura 53 Geometría de engranajes	102
Figura 54 Caja de engranajes vertical.....	102
Figura 55 Pared de Caja de Reducción.....	103
Figura 56 Esfuerzo según Von Misses Stress de una Fuerza en engranaje	105
Figura 57 Factor de Seguridad con Diseño CAE	106
Figura 58 Desplazamiento máximo del engranaje con diseño CAE	106
Figura 59 Ejes de Caja de Reducción.....	107
Figura 60 Caja de reducción.....	107

Figura 61 Distribución de Motores.....	108
Figura 62 Análisis CAE de Placa Base Von Mises	110
Figura 63 Análisis CAE de Placa Base Desplazamiento.....	111
Figura 64 Análisis CAE de Placa Base Factor de Seguridad	111
Figura 65 Contorno de Plataforma Robótica Móvil	112
Figura 66 Batería de Ácido de 7 Ah.....	114
Figura 67 Driver A4988	115
Figura 68 Esquema de Conexión del Motor a Pasos	116
Figura 69 Esquema de Conexión en Proteus 8	116
Figura 70 Conversor 12Vdc-5Vdc LM2596	117
Figura 71 Esquema de Conexión de Motores a Pasos.....	118
Figura 72 Diseño Final del Módulo de Estructura y Movimiento Vista Isométrica	120
Figura 73 Diseño Final del Módulo de Estructura y Movimiento Vista Superior	120
Figura 74 Geometría de Tapa del Robot Móvil.....	122
Figura 75 Análisis CAE de Tapa Von Mises	123
Figura 76 Análisis CAE de Tapa Desplazamiento	123
Figura 77 Ensamble de Rplidar con Tapa	124
Figura 78 Esquema Rplidar A1 M8.....	124
Figura 79 Esquema de Conexión de Lidar por USB	126
Figura 80. Robot ensamblado con Moduló de medición de Entorno	126
Figura 81 Relación entre Nodos para Obtención de SLAM.....	128
Figura 82 Relación entre Nodos para Obtención de Recuperación de la Ubicación.....	130
Figura 83 Corte de Acero Galvanizado 1,1mm.....	133
Figura 84 Taladrado de Agujeros de sujeción de elementos	133
Figura 85 Barolado de plancha para Contorno del Robot	134
Figura 86 Soldadura de la Estructura del Robot.....	135
Figura 87 Estructura del Robot Final	135
Figura 88 Eje de Caja de Reducción	136
Figura 89 Torneado de Ejes.....	136
Figura 90 Corte Laser	137
Figura 91 Plano de Corte Laser	137

Figura 92 Cortes Laser de Engranajes y Paredes	138
Figura 93 Ensamble del Robot	138
Figura 94 Circuito de Control.....	139
Figura 95 Construcción de Placa PCB	139
Figura 96 Construcción de Piso.....	140
Figura 97 Tapa con Corte Laser	141
Figura 98 Impresión 3D para soportes	141
Figura 99 Ensamble de Soportes en Robot.....	142
Figura 100 Cable USB para Rplidar	142
Figura 101 Ensamble Final.....	143
Figura 102 Interfaz del Usuario en SLAM	144
Figura 103 Interfaz de Recuperación de la Ubicación	145
Figura 104 Lanzadores Robot.....	145
Figura 105 SLAM de Local.....	147
Figura 106 Local 12x10 m.....	147
Figura 107 Líneas de Comparación de medidas.....	148
Figura 108 Resultado de Recuperación de la Ubicación del Robot	150
Figura 109 Resultados SLAM CICTE.....	151
Figura 110 Resultado de Recuperación de la Ubicación CICTE	153

RESUMEN

Los vehículos terrestres no tripulados (UGV) han experimentado un creciente interés en varios temas de investigación dentro de la localización y navegación autónoma. Las aplicaciones comunes en localización y navegación autónoma incluyen Slam, Planificación de ruta, Odometría, Localización global, entre otras. Un problema común en la localización y navegación autónoma es el problema de Localización y Mapeo Simultaneo (SLAM) que consiste en realizar el mapa de la estructura en la que se encuentra el robot y Recuperación de la Ubicación ante el problema del Robot Secuestrado (Kidnapped Robot Problem), que consiste en la ubicación de la posición global del mapa, de cualquier posición en el momento en que se inicia o se secuestra el robot. Este trabajo se enfoca en resolver en primera instancia el problema de SLAM en interiores, y seguido de resolver el problema del Robot secuestrado basado en la localización de Monte Carlo (MCL). Se presenta el diseño y la construcción del robot móvil seguido de las pruebas y resultados de estas funciones en el robot. Este documento está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se inicia con una Introducción al proyecto, en el capítulo 2 se tiene el estado del arte donde se habla de algoritmos utilizados para la resolución de este problema, en el capítulo 3 se realiza el diseño de la plataforma móvil para interiores. En el capítulo 4 se presenta la construcción del robot y pruebas con sus resultados donde se muestra los resultados en tiempos de convergencia y en exactitud de la estimación de la posición, finalmente en el capítulo 5 se presenta conclusiones y recomendaciones.

PALABRAS CLAVE:

- **UGVs**
- **LOCALIZACIÓN Y MAPEO SIMULTÁNEO (SLAM)**
- **AUTONOMÍA DE ROBOT MÓVIL**
- **RECUPERACIÓN DE LA UBICACIÓN ANTE RAPTO (KIDNAPPED ROBOT PROBLEM)**

ABSTRACT

Unmanned Ground Vehicles (UGVs) have experienced an increasing interest in several research topics within localization and autonomous navigation. Common applications in localization and autonomous navigation include Slam, Path planning, Odometry, Global localization, and others. A common problem in autonomous localization and navigation is the problem of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) that involved in making the map of the structure in which the robot is located and the localization recovery against a Kidnapped Robot Problem, which consists of the mobile robot being able to locate itself in its global position from any localization at the moment where it starts or it's kidnapped. This work focuses on solving the SLAM problem in the first place, and then solving the Kidnapped Robot Problem based on the location of Monte Carlo (MCL). The design and construction of the mobile robot is presented followed by the tests and results of these functions in the robot. This document is organized as follows: Chapter 1 starts with an Introduction to the project, in Chapter 2 we have the state of the art where we talk about algorithms used to solve this problem, in Chapter 3 the design of the indoor mobile platform. Chapter 4 presents the construction of the robot and tests with its performance showing the results in times of convergence and in the accuracy of the estimation of the position, finally in chapter 5 conclusions and recommendations are presented.

KEYWORDS:

- UGVs
- SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING (SLAM)
- MOBILE ROBOT AUTONOMY
- KIDNAPPED ROBOT PROBLEM

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el primer capítulo se presenta la necesidad de la autonomía de una plataforma robótica móvil para interiores de edificaciones resolviendo el problema del robot secuestrado en un entorno cerrado. Dentro de este contexto se realiza una breve revisión acerca de la autonomía y funcionamiento de los robots móviles. Se presenta el problema y la importancia de su resolución. Se describen trabajos relacionados al tema como antecedentes y se plantean los objetivos, el alcance del proyecto y la estructura del documento donde se explica el temario de los próximos capítulos.

1.1. Planteamiento del problema

Se define como robot autónomo aquellos que pueden realizar las tareas deseadas en entornos no estructurados y sin guía humana (Todea, 2013). En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en los últimos años se han realizado investigaciones sobre autonomía en robótica móvil, siendo uno de sus problemas a resolver el de recuperar la ubicación del robot en un mapa conocido al momento del encendido o al momento de raptó. La recuperación de la ubicación se debe realizar con un plano ya existente; por lo que se genera primero un mapa con SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) y consecuentemente al mapa guardado se recupera la ubicación del robot con teorías probabilísticas de resolución al problema del robot raptado (Kidnapped Robot Problem).

Existen algunos prototipos desarrollados en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, como la plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015) que actualmente se encuentra en una etapa de mejora e investigación, y permite realizar mapeo y localización simultanea (SLAM). Otro prototipo realizado en dicha universidad es la plataforma robótica para exteriores con su sistema de ubicación (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016) el cual permite realizar SLAM en exteriores y gracias al uso de un Router no necesita cables de conexión para obtener odometría, por lo que posee una mayor autonomía en su movimiento. Estos prototipos se han ido mejorando con buenos resultados dentro de las aplicaciones para los cuales se han diseñado y construido, sin embargo, ninguna tiene resuelto el problema de la recuperación de la ubicación del robot en un mapa conocido al momento de su encendido o al momento de rapto.

Adentrándonos en el problema planteado, se construirá un robot móvil de estructura pequeña que tendrá la posibilidad de realizar SLAM y tendrá un control de motores óptimo, que combinando con datos de distancias obtenidos por un sensor Lidar, puede generar la odometría necesaria para aplicar algoritmos de recuperación de la ubicación. Las ventajas alcanzadas por este proyecto será la autonomía del Robot para poder saber dónde está y a donde puede dirigirse partiendo de un mapa que él mismo generará, sin necesidad de empezar en su Home (Punto de Partida).

1.2. Antecedentes

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ha desarrollado en los últimos años nuevas investigaciones en diferentes campos. Uno de ellos es el campo de la robótica móvil, en la cual ha tomado una importancia muy significativa en investigaciones.

El laboratorio posee los siguientes trabajos en el área de plataformas móviles para interiores y exteriores:

1. Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015). Este proyecto consiste en el diseño y construcción de una plataforma móvil que ocupa sensores ultrasónicos para medir distancias en las 8 caras del robot y un sensor Kinect que permite tomar datos de distancia frontal para al unirlo con odometría, realizar SLAM. La plataforma se conecta a una computadora para iniciar el mapeo como se muestra en la Figura 1. El proyecto puede realizar el mapeo con el algoritmo de Gmapping del Sistema Operativo de Robótica llamado ROS, y se controla el movimiento del robot por medio del computador o un Joystick. Actualmente esta plataforma de interiores se encuentra en otra fase de mejora e investigación.



Figura 1 Plataforma robótica móvil de interiores
Fuente: (Gallardo Andrade & Gaona Román , 2015)

2. Diseño de un sistema de ubicación para la plataforma robótica para exteriores teleoperada del laboratorio de exteriores (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016) .Plataforma diseñada para exteriores, y posee la capacidad de ser teleoperada mediante la unión de una Raspberry y un Router, el cual conecta al Robot por Wifi. Utiliza un sensor Lidar en conjunto con un mecanismo

que permite el giro del sensor, esto permite tomar datos de distancia en 360°, lo cual servirá para SLAM. El proyecto utiliza el algoritmo de Héctor Slam de ROS para obtener el mapa, y su movimiento puede ser mediante botones en el computador o utilizando códigos QR en la cámara; la plataforma de exteriores se muestra en la Figura 2.



Figura 2 Plataforma de Exteriores

Fuente: (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016)

Un recurso necesario al realizar SLAM con Lidar es el Filtro Kalman el cual consiste en generar la mejor estimación para el sistema de estados dada la información disponible al sistema utilizando un método recursivo de mínimos cuadrados y que produce una secuencia con respecto al tiempo, este filtro permite tener un buen funcionamiento en entornos dinámicos de seguimiento de rasgos estáticos descartando los no estáticos (Perez , 2012).

Estos estudios son importantes para este proyecto porque son la base que se utilizará para la creación del robot y los principios matemáticos que se colocará en el algoritmo para obtener un resultado excelente para el proyecto de titulación.

En investigaciones con respecto al Kidnapped Robot Problem (Problema del Rapto) como un problema de autonomía del robot, tenemos investigaciones realizadas por la International Journal Of Advanced Robotic Systems, en Monte Carlo para un desplazamiento natural de un robot. (Ismail, 2017), en estas investigaciones se utiliza métodos probabilísticos que mediante la estimación de la distancia de los puntos, y utilizando el filtro de partículas, el algoritmo permite convergen en una posición estimada al robot.

1.3. Justificación e importancia

Mediante la investigación y desarrollo se permite generar robots cada vez con un grado de autonomía mayor, para lo cual se debe resolver problemas puntuales de autonomía un paso a la vez. Para lograr que un robot móvil sea autónomo debemos responder a 3 preguntas básicas: ¿Dónde estoy?, ¿Hacia dónde voy? y ¿Cómo llego ahí? (Todea, 2013), por lo cual es necesaria la resolución del problema de la recuperación de la ubicación, dado que esta solución nos permite responder a la primera pregunta ¿Dónde estoy?, y gracias al SLAM nos permite responder a una pregunta particular ¿A dónde puedo ir?

La recuperación de la ubicación se debe realizar en un mapa existente; por lo que se genera primero el mapa con SLAM y consecuentemente al mapa guardado se le aplica el algoritmo para la recuperación de la información con teorías probabilísticas de Kidnapped Robot Problem. Podemos al final tener el resultado de un robot que, al momento de encendido del mismo, y previamente guardado el mapa, puede encontrar su ubicación y poder realizar la actividad para la cual es creado.

El fin de la presente tesis es poder solventar los problemas de ubicación y localización de un robot móvil. Por ello se aplicará SLAM que permitirá tener la capacidad de elaborar mapas de áreas

cerradas (edificaciones) y obtener la localización del robot en el plano generado. Luego utilizando Métodos probabilísticos de Kidnapped Robot Problem se pueda recuperar la ubicación del robot, sea cual fuere su posición inicial. Las ventajas alcanzadas por este proyecto será la autonomía del Robot para que esté pueda responder a dos preguntas básicas las cuales son: ¿Dónde estoy? y ¿A dónde puede ir?

El trabajo que se realizará es importante para el desarrollo de prototipos en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y crecimiento en su investigación sobre robótica móvil.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un robot móvil el cual permita realizar SLAM, y la recuperación de la ubicación en el caso de Rapto.

1.4.2. Objetivos Específicos

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

- Diseñar y construir la estructura del robot móvil que soporte la carga de sensores, fuentes, controladores y actuadores.
- Diseñar e implementar el sistema electrónico del robot móvil y seleccionar los actuadores y su control
- Implementar el control de la plataforma robótica móvil utilizando el sistema operativo robótico (ROS).
- Implementar SLAM en la plataforma robótica

- Implementar teorías Probabilísticas para realizar recuperación de la ubicación en caso de

Rapto

1.5. Alcance

Este proyecto consiste en la ampliación de la investigación sobre robótica móvil que existe en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para lo cual se realizará los siguientes puntos en el proyecto:

Se diseñará y se construirá la estructura del robot móvil de forma que dicho robot pueda realizar movimientos soportando el peso de los elementos como motores, placa madre, llantas, sensores, en total un peso aproximado de 6 Kg, y de forma que el robot permita tener un movimiento ágil y pueda desplazarse sobre un piso con un plano inclinado de hasta 5°.

Se instalará el conjunto de motores y llantas que permitan al robot móvil desplazarse en pisos de interiores, estos deben ser con una sujeción de forma que el robot no pierda pasos o resbale, de esa forma podemos obtener una precisión muy alta en la medida de las distancias recorridas, lo que permitirá que la odometría del robot sea buena.

Se instalará un sensor LIDAR que permita el primero generar el Laser Scan que es la medida de las distancias y el segundo es para la odometría del robot.

La plataforma podrá crear un mapa del lugar y ubicarse respecto al mismo de manera exacta utilizando algoritmos para SLAM y podrá recuperar la ubicación en caso de Rapto con algoritmos para Kidnapped Robot Problem.

1.6. Estructura del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos donde se mostrará y describirá todo el desarrollo y la información a realizar sobre el diseño y construcción de un robot móvil para Slam con recuperación de ubicación en el caso de rapto.

En el capítulo 1 se presenta las generalidades y precedentes que se tiene atrás del proyecto a realizar y se definen los objetivos y el alcance del mismo. En el capítulo 2 se muestra un enfoque general sobre al campo de la robótica móvil. Se presenta además la conceptualización de los sistemas involucrados en la autonomía del robot. En los sistemas que interactúan en el robot se tiene a los métodos de localización, métodos de SLAM y algoritmos de Kidnapped Robot Problem.

En el capítulo 3 se presenta el diseño del prototipo en base al diseño Mecatrónico donde se detallarán el desarrollo de conceptos, selección de conceptos, pruebas de los conceptos y finalizando con el prototipo.

En el capítulo 4 se presenta la construcción e implementación de los sistemas desarrollados en el robot móvil donde se detalla las pruebas realizadas y los 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 II

ESTADO DEL ARTE

El capítulo presenta la conceptualización sobre robótica móvil, también se centra en los métodos de navegación y ubicación del robot. Incluye el detalle sobre la cinemática de los robots móviles y métodos de navegación. Se plantea algoritmos para la solución del problema de localización y mapeo simultáneo (SLAM) y recuperación de la ubicación en caso de raptó (Kidnapped Robot Problem) que se implementará en la plataforma móvil.

2.1. Robótica Móvil

2.1.1. Historia de la robótica móvil

Un robot móvil se define como “una máquina autómatas que posee la capacidad de movimiento dentro de un ambiente propio” (Bräunl, 1998), Pero para llegar a ser un autómatas es necesario que el robot posea la habilidad de navegar en el espacio evitando colisiones (Aguilar, Casaliglla, 2017a), (Aguilar, Casaliglla, 2017b), (Aguilar, Casaliglla, 2017c), desplazarse en un ambiente (Aguilar, Salcedo, 2017), (Aguilar, Angulo, 2017), tener percepción y localización en el ambiente (Aguilar, Rodríguez, 2017a), (Aguilar, Rodríguez, 2017b), (Aguilar, Rodríguez, 2017c),.

Para llegar a obtener un sistema autónomo como se lo menciono anteriormente se realizan investigaciones en 1966 hasta 1972, en este tiempo se desarrolló el primer robot móvil llamado Shakey en Stanford Research Institute (actualmente llamado SRI Internacional) (Kuipers, Nilsson, & Feigenbaum, 2017), el cual consistía en una plataforma móvil autónoma controlado por visión. A partir de este robot móvil, este tipo de robot fueron objeto de estudios y mejoras.

En los años 70 aparecen varias investigaciones sobre robótica móvil, entre las más destacadas tenemos al Lunar Rover (Thompson, 1977) diseñado para la exploración planetaria en el cual se analiza la estructura de control del robot de investigación JPL y las operaciones del subsistema de navegación. Este robot funciona como una red de procesos simultáneos interactivos distribuidos entre varias computadoras y coordinados por un ejecutivo central. Otro robot móvil importante aparece en el año 1979 y es llamado el robot Hilare (Giralt & Sobek , 1979) el cual consistía en un robot equipado con sensores ultrasónicos y un láser telemétrico que permitía analizar su entorno de movimiento.

Años más tarde, se desarrollan los primeros robots con una locomoción basado en patas en vez de llantas, en 1994, el Instituto de robótica CMU desarrolló el robot Dante II (Bares & Wettergreen, 1999), un sistema de seis patas. En 1997 también en el CMU, se desarrolló el robot Gyrover (Brown, 1997), un mecanismo ausente de ruedas y patas basado en el funcionamiento del giroscopio.

Los robots mencionados, son únicamente una porción de los tantos que se han diseñado, pero es posible notar que las aplicaciones de estos son vastas debido al desarrollo cada vez más vertiginoso de la tecnología.

2.1.2. Clasificación de los robots móviles

Las clasificaciones de los robots móviles pueden ser de dos formas, la primera consiste en el medio en el que se desenvuelven (Kurfess, 2005) y la segunda es por su tipo de locomoción (Ortigoza & Sánchez, 2007).

2.1.2.1. Clasificación de los robots móviles por su medio

La clasificación por su medio (Kurfess, 2005) tenemos:

- Terrestres: Son robots que se desplazan en tierra como se observa en la Figura 3, son los más comunes en la investigación y tiene múltiples aplicaciones, estos robots funcionan sin necesidad de ser tripulados, dependiendo de su tecnología aplicada.



Figura 3 Robot Móvil Terrestre

Fuente: (Soria, Carelli, Kelly, & Zannatha, 2004)

- Aéreos: Son un tipo de robot semejante a aviones o helicópteros como se muestra en la Figura 4, pero con la diferencia de no tener tripulación. Se los han denominado comúnmente como drones y son usados en tareas de vigilancia (Aguilar, Luna, 2017), (Aguilar, Luna, 2017b), (Aguilar, Luna, 2017c), (Aguilar, Luna, 2017d), (Aguilar, Luna, 2017e), policía, bombero, mapeo, reparto, entre otras aplicaciones de filmografía (Aguilar, Angulo, 2016), (Aguilar, Angulo, 2014a), (Aguilar, Angulo, 2014b).



Figura 4 Robot Móvil Aéreo

Fuente: (Avion Insurance, 2018)

- Acuáticos: Son robots capaces de desplazarse sobre o bajo el agua sin la necesidad de ser tripulado. Las aplicaciones para este tipo de robot son extensas al punto que abarcan desde la exploración de vida acuática hasta aplicaciones militares, un ejemplo se puede observar en la Figura 5



Figura 5 Robot Móvil Acuático

Fuente: (USTA/VANGUARDIA LIBERAL, 2014)

2.1.2.2. Clasificación de los robots móviles por su locomoción

Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de locomoción utilizado (Ortigoza & Sánchez, 2007), en general son por tres medios de movimiento:

- Por ruedas: Es el tipo de robot que mayor desarrollo tiene actualmente, llamados también RMR por Robots Móviles con Ruedas, y destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes a la vez que requiere un menor número de partes, un ejemplo es el GOREX mostrado en la Figura 2.
- Por patas: Uno de los primeros robots realizados con patas fue Genghis (Colin, 1989) Figura 6, el cual tiene un diseño de 6 patas, este tipo de robot destaca por su habilidad de imitar a un animal con 6 patas y de tener la capacidad de desplazarse por superficies rugosas y no firmes.



Figura 6 Robot Móvil con patas Genghis
Fuente: (Colin, 1989)

- Por orugas: Este tipo de robot tiene una forma especial de serpiente, una de las primeras investigaciones realizadas de este tipo de locomoción es del Robot Serpiente (Granosik & Borenstein, 2005) Figura 7.



Figura 7 Robot Móvil tipo oruga
Fuente: (Granosik & Borenstein, 2005)

2.1.3. Sistemas de locomoción de robots móviles de ruedas (RMR)

Para terrenos duros, planos y libres de obstáculos, como son los del interior de una infraestructura, la solución más simple es la del uso de un vehículo con ruedas, con ello se obtiene sencillez en su construcción, velocidades relativamente altas y economiza costos. Pero la locomoción en terrenos blandos al usar ruedas es muy poco eficiente.

A continuación, se explican las características de los sistemas de locomoción principales y más comunes de robots móviles de ruedas.

2.1.3.1. Tipo Coche o Ackerman

El sistema se basa en cuatro ruedas de las cuales las dos ruedas delanteras son del tipo direccionamiento y son las encargadas de definir la trayectoria del robot mientras que las dos ruedas traseras que se montan paralelamente en el chasis del principal son las encargadas de generar el trabajo (Baño , 2003) para que el robot inicie su movimiento. Este tipo de sistema de locomoción se asemeja a los vehículos convencionales.

La geometría del robot consiste en que al girar las ruedas delanteras un pequeño ángulo se genera mediante la prolongación del eje de las ruedas traseras (motrices) y la prolongación de un eje a 90° de cada rueda delantera (directrices) un corte donde se ubica el Centro Instantáneo de Rotación (CIR) como se muestra en la Figura 8, el cual el robot genera una circunferencia concéntrica con el centro de rotación mencionado.

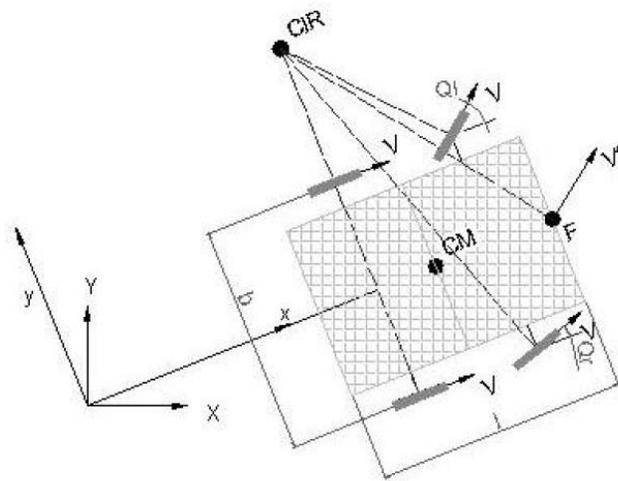


Figura 8 CIR generado por el cambio de dirección de las ruedas delanteras

Fuente: (Baño , 2003)

Sin embargo, el principal problema de este tipo de geometría es la poca maniobrabilidad que tiene el robot, por tener un Centro instantáneo de rotación variable y dependiente al ángulo formado por cada rueda directriz.

2.1.3.2. Triciclo Clásico

Este sistema se basa en el uso de tres ruedas en el robot de las cuales tienen un parecido al sistema Ackerman, pero con la diferencia de que solo posee una rueda delantera la cual es la directriz y en la parte trasera dos ruedas que pueden moverse libremente. Esta configuración posee

una mayor maniobrabilidad que la configuración de Ackerman por la existencia de solo una rueda directriz como se muestra en la Figura 9 el cual permite que el centro de gravedad se mueve dependiendo del ángulo de la rueda directriz, pero el problema que se tiene en este tipo de geometría es que al tener solo una rueda de apoyo delantero genera problemas de estabilidad en terrenos difíciles (Baño , 2003).

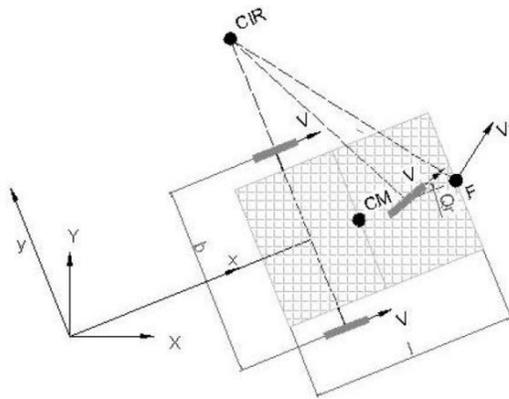


Figura 9 Configuración tipo triciclo

Fuente: (Baño , 2003)

2.1.3.3. Tracción Diferencial

El nombre de tracción diferencial viene dado porque el direccionamiento de este tipo de configuración depende la diferencia de velocidades de las ruedas laterales. Consiste en un sistema de dos ruedas montadas en un único eje las cuales son independientemente propulsadas y controladas, proporcionando tracción y direccionamiento (Baño , 2003). Suele tener una configuración de dos hasta cuatro ruedas, donde dos ruedas son ruedas motrices y el resto son de apoyo de la estructura, para generar estabilidad, también existe el caso de 4 o más ruedas motrices que es una variante de este tipo llamado Skid-Steer como se muestra en la Figura 10, pero para usar esta configuración es necesario que todas las ruedas de cada lado giren a la misma velocidad.

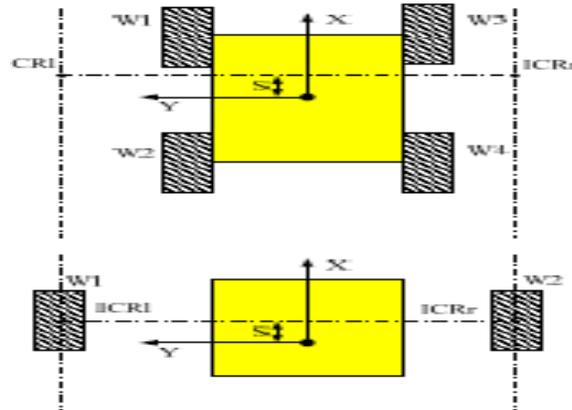


Figura 10 Configuración Skid-Steer

Fuente: (Wang, y otros, 2015)

La combinación del movimiento de las dos ruedas provoca un movimiento alrededor del Centro instantáneo de Rotación, pero existe formas en el que las velocidades de las llantas son distintas y es cuando posee un Centro instantáneo de rotación que se encuentra en el eje de las llantas, pero no en el centro de las dos, con este principio se puede generar una trayectoria como se muestra en la Figura 11. Este sistema es muy útil si consideramos la habilidad de movimiento del robot, que puede cambiar su orientación sin movimientos de traslación.

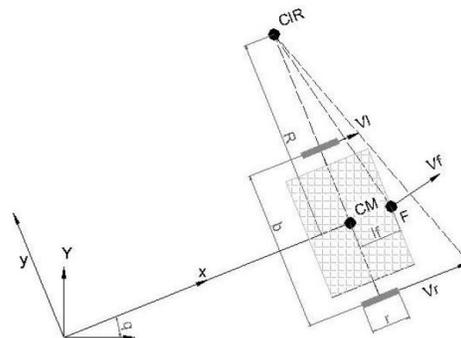


Figura 11 Configuración Diferencial

Fuente: (Baño, 2003)

Las variables de control son las velocidades de las ruedas (izquierda y derecha independientemente), de las cuales existen modelos cinemáticos existentes que proporcionan trayectorias perfectamente definidas.

2.1.3.4. Síncronas

Este tipo de sistema de locomoción consiste en la actuación simultánea de todas las ruedas que giran de forma síncrona, pero esta transmisión se consigue usando coronas de engranajes o correas concéntricas.

Este tipo de sistema requiere que cada rueda tenga dos grados de libertad, la primera para propulsar el robot y la segunda para girar y la configuración que necesita este tipo de sistema de locomoción depende de dos condiciones que deben cumplirse, la primera consiste en que las tres ruedas directrices estén acopladas formando un triángulo equilátero, y la segunda es que todas las ruedas propulsan y giran al unísono, como se muestra en la Figura 12.

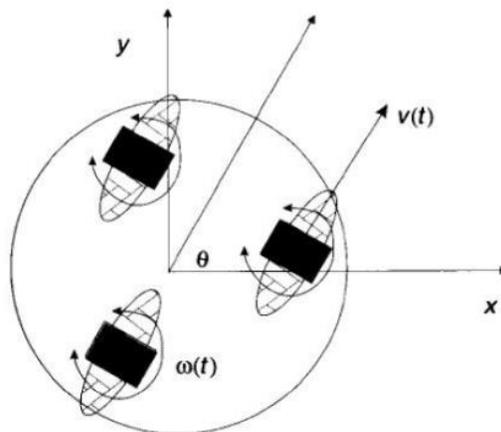


Figura 12 Configuración Síncrona de tres ruedas directrices
Fuente: (Baño , 2003)

2.1.3.5. Tracción Omnidireccional

Este sistema de tracción se basa en utilizar tres ruedas directrices y motrices, pero estas ruedas tienen que ser omnidireccional como se muestra en la Figura 13. Tiene tres grados de libertad, por lo que puede realizar cualquier movimiento, y ubicarse en cualquier posición y en cualquier orientación. Sus ventajas es que no presenta limitaciones cinemáticas (Baño , 2003), pero presenta complicaciones en el control de cada motor, dado que para realizar algún movimiento requiere un análisis cinemático más complejo. En la Figura 14 se presenta un diagrama de configuración omnidireccional.



Figura 13 Rueda Omnidireccional
Fuente: (Microkits, 2018)

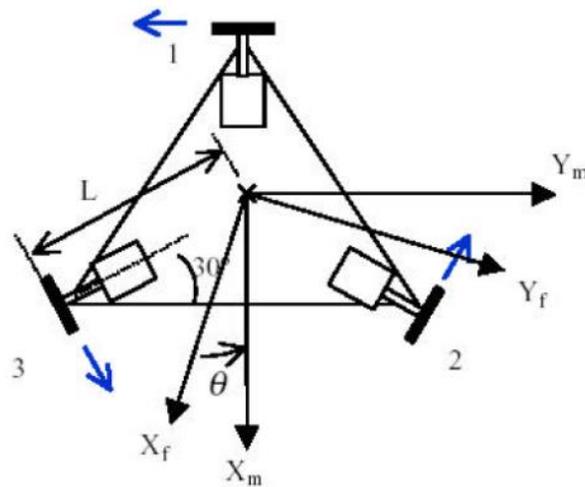


Figura 14 Diagrama de configuración omnidireccional
Fuente: (Baño , 2003)

2.2. Navegación

2.2.1. Concepto de misión, navegación y operación

Una misión es el objetivo que el robot tiene que llevar a cabo, y para ello coordina el control de desplazamiento (la navegación) y la interacción con el entorno de trabajo (la operación), definiendo de esta forma se presenta un módulo de control de misión (Muñoz, Ollero, Prado, & Simon, 1994), Esta coordinación debe efectuarse de forma perfecta para cumplir los objetivos impuestos por la misión, definida de acuerdo con ciertas especificaciones de entrada. En la figura 15 se muestra la interacción entre estos tres conceptos donde el control de misión debe analizar el problema y encontrar una estrategia para resolverlo, de suerte que el resultado de este análisis será un plan de navegación y otro de operación.

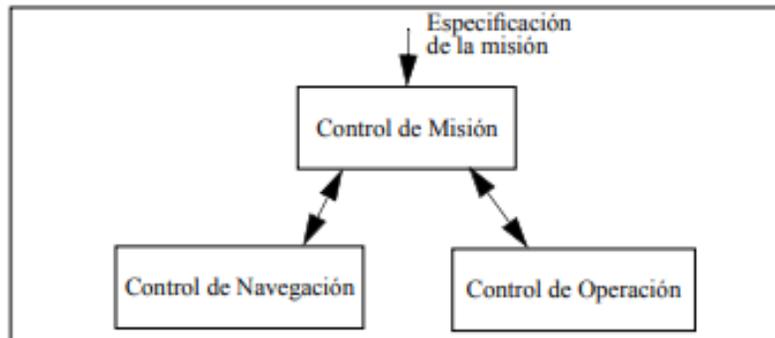


Figura 15 Esquema básico de control de misión

Fuente: (Muñoz, Ollero, Prado, & Simon, 1994)

2.2.2. Navegación en robótica móvil

La navegación en robótica móvil se define como la habilidad del robot de terminar el curso o trayectoria a través de un entorno desconocido, cambiante o conocido y la meta final es llevar al robot de un punto a otro de manera eficiente y segura.

Los principales problemas de la navegación son: la percepción del entorno, la cual consiste de manera resumida en interpretar los datos que se suministran de los sensores y extraer de manera útil información; la localización en tiempo real que radica en determinar la posición del robot en el entorno de forma global y local; la planificación (Aguilar, Morales, 2017a), (Aguilar, Morales, 2017b), (Aguilar, Morales, 2017c), (Aguilar, Abad, 2017), que es decidir cómo actuar para alcanzar el objetivo y el control de movimiento que es la gestión de los actuadores (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016), lo cual se puede observar en la Tabla 1 presentada a continuación.

Tabla 1
Proceso de Navegación

Percepción		Interpretar los datos que le suministra sus sensores para extracción de información útil
Localización	El robot debe	Determinar su posición en el entorno
Planificación	ser capaz de:	Decidir cómo actuar para alcanzar el objetivo
Control de Movimiento		Gestionar sus actuadores para conseguir la trayectoria deseada

Fuente: (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016)

2.3. Percepción

En la creación de robots con autonomía es de gran importancia adquirir información del entorno en el que se encuentra, midiendo fenómenos físicos con su sistema sensorial al igual que lo hace el ser humano con sus sentidos: la vista, el olfato, el tacto, el oído y el gusto. Por lo cual es importante tener criterios de diseño para el sistema sensorial de un robot, el cual tiene que tomar datos de sensores y discriminar para obtener información útil de su entorno.

El sistema sensorial en los seres humanos está enormemente desarrollado. Y a lo largo de la historia se ha buscado tener una percepción semejante a la del ser humano para los robots, lo cual es un motivo de estudio y de investigación.

En el sistema sensorial de un robot tenemos dos tipos de sensores: los sensores internos los cuales se ubican en la estructura interna del robot y nos permiten obtener información de parámetros internos tales como posición, velocidad o ángulo de giro de cada una de las articulaciones. Y los sensores externos que se ubican en las afuera de la estructura mecánica y

permiten captar información tanto de posiciones orientaciones e información relativa del entorno de trabajo. (Torres Medina, 2004)

2.3.1. Sensores

Un robot es una máquina capaz de interactuar con su entorno, para adquirir información necesaria que permita realizar la misión para lo cual fue creado. Al ser el objetivo del proyecto planteado la creación del mapa del entorno y luego recuperar la ubicación del robot, es necesario tener un sistema sensorial que obtenga datos necesarios para la localización del robot.

A continuación, se analiza sensores de medición de distancia que pueden ser utilizados para el proyecto.

2.3.1.1.Sonar

Un sonar es un sensor de sonido que trabajan a frecuencias de 16Hz hasta 20 KHz, que son menores a las frecuencias que perciben los seres humanos (40KHz), por lo cual se le llama ultrasonidos. (Pérez, 2006)

El funcionamiento básico del sensor como medidor de distancia se muestra en la Figura 16. El Transmisor emite un pulso acústico que rebota sobre un determinado objeto u obstáculo y la reflexión de ese pulso es detectada por el Receptor del sensor. La mayoría de sensores de este tipo son de bajo costo y se basa en una emisión de un pulso ultrasónico cuyo campo de acción es cónico, y se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo como la fórmula (2-1).

$$d = \frac{1}{2} V \cdot t \quad (2-1)$$

Donde V es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso.

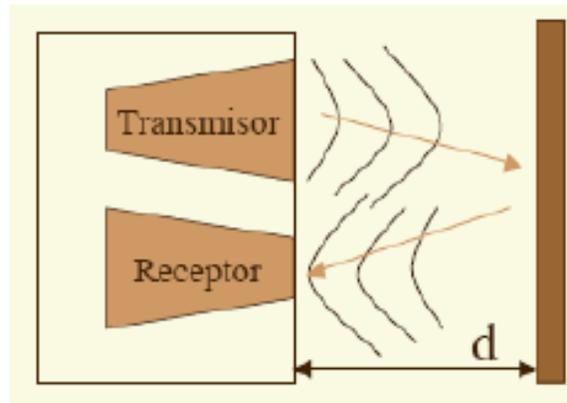


Figura 16 Principio de funcionamiento de un Sonar

Fuente: (Pérez, 2006)

Para adquirir un alto grado de conocimiento del entorno usando este tipo de sensores, en la robótica móvil se utiliza un anillo de sonares mostrado en la Figura 17, que es una distribución de sensores de forma que permita al robot obtener mayor cantidad de datos para su análisis.



Figura 17 Anillo de sonares

Fuente: (Cordoba L & Mejía L , 2004)

Estos sensores presentan ciertos errores comunes:

Al tener forma cónica el campo de actuación del pulso, se puede recibir como respuesta la reflexión de un objeto que no se encuentra en frente del robot, sino que se encuentra en una esquina alejada del mismo, a este error se le llama incertidumbre angular en la medida (Pérez, 2006), como se puede observar en la Figura 18.

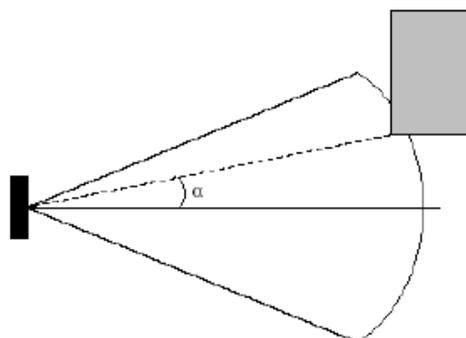


Figura 18 Incertidumbre angular
Fuente: (Pérez, 2006)

Otro problema también son los factores ambientales que tiene una gran repercusión sobre las medidas de las ondas de ultrasonido ya que se mueven por un medio material que es del aire, la densidad del aire depende de la temperatura y por eso es que la temperatura influye en la velocidad de propagación de la onda.

También se encuentra un error muy común llamado el de Falsos ecos y pueden darse por diferentes razones: Puede darse el caso en que la onda emitida por el transductor se refleje varias veces en diversas superficies antes de que vuelva a incidir en el transductor. Otra razón es el llamado crosstalk (Pérez, 2006) que ocurre cuando se emplea un anillo de sonares y consiste en que un sensor emita un pulso y sea recibido por otro sensor que estuviese esperando el eco del pulso que él había enviado con anterioridad (o viceversa). En la Figura 19 Errores de falsos ecos se muestra estos posibles errores.

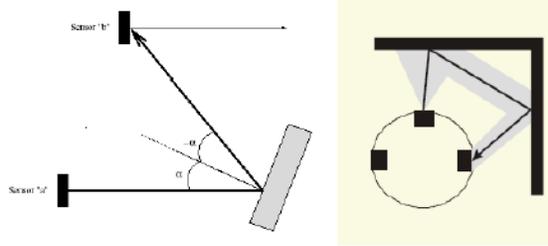


Figura 19 Errores de falsos ecos

Fuente: (Pérez, 2006)

2.3.1.2. Kinect

La Kinect es un dispositivo el cual fue desarrollado inicialmente para videojuegos específicamente consolas de Xbox que cuenta con varios sensores y un procesador personalizado que ejecuta un programa patentado y que proporciona captura de movimiento de todo el cuerpo en 3D, reconocimiento facial y capacidades de reconocimiento de voz, a la vez llevar a cabo la localización de la Fuente acústica.

La Kinect está provisto 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, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20 Sensor Kinect

Fuente: (Galindo & Ruiz- Sarmiento, 2010)

El sensor de Kinect reproduce video a una frecuencia de 30 Hz, en colores RGB 32-bit y resolución VGA de 640×480 píxeles, el canal de video monocromo es de 16-bit, resolución QVGA de 320×240 píxeles con hasta 65,536 niveles de sensibilidad. El límite del rango visual del sensor de Kinect está entre 1.2 y 3.5 metros de distancia, con un ángulo de vista de 57° horizontalmente y un ángulo de 43° verticalmente, mientras que el pivote puede orientarse hacia arriba o abajo ampliando hasta 27°. El array del micrófono tiene cuatro cápsulas, y opera con cada canal procesando 16-bit de audio con una ratio de frecuencia de 16 kHz (Microsoft, 2018), y se presenta el diagrama de bloques de la Kinect en la Figura 21.

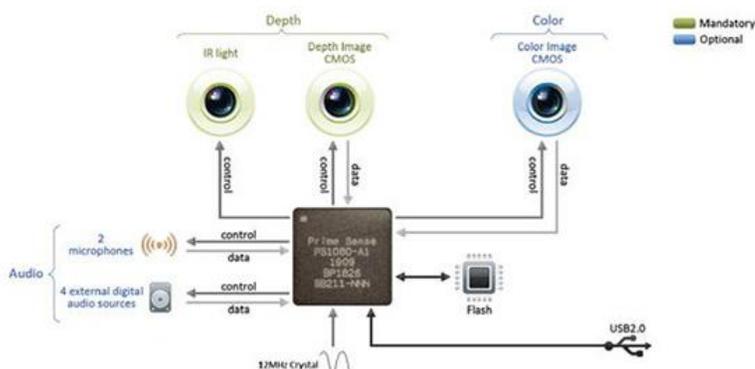


Figura 21 Diagrama de Bloques Kinect
(Microsoft, 2018)

2.3.1.3.Lidar

El sensor LIDAR (Light Detection and Ranging) es un sensor que funciona mediante la emisión de pulsos de luz láser segura para los ojos y la medición precisa del tiempo de retorno del pulso del sensor. Su funcionamiento es semejante al sonar, dado que realiza la medición de distancia de un objeto u obstáculo con respecto al robot en función al tiempo de vuelo (TOF). Cada dato o punto generado con Lidar por sí solo no tiene mucha utilidad; sin embargo, al unir los

millones de puntos generados a partir de un barrido con un escáner láser en un área específica, se pueden recrear superficies en tres dimensiones con las que posteriormente se puede trabajar.

El principio de funcionamiento del Lidar es semejante al sonar; hace brillar una pequeña luz en una superficie y mide el tiempo en que tarda la luz en regresar a la fuente. Cuando se ilumina la superficie significa que la luz reflejo y como la velocidad de la luz es $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ el equipo necesario para poder realizar estas mediciones tiene que operar extremadamente rápido. Gracias a los avances tecnológicos en la actualidad se puede realizar este tipo de mediciones y almacenar en segundos cuando se iluminan diferentes puntos de una superficie con un equipo láser (Campbell & Wynne, 2011)

El sensor LIDAR se utiliza principalmente en aplicaciones de representación cartográfica láser aéreas, está surgiendo como una alternativa rentable para las técnicas de topografía tradicionales como una fotogrametría, como se muestra en la Figura 22. Pero en los últimos años se ha utilizado para vehículos terrestres.

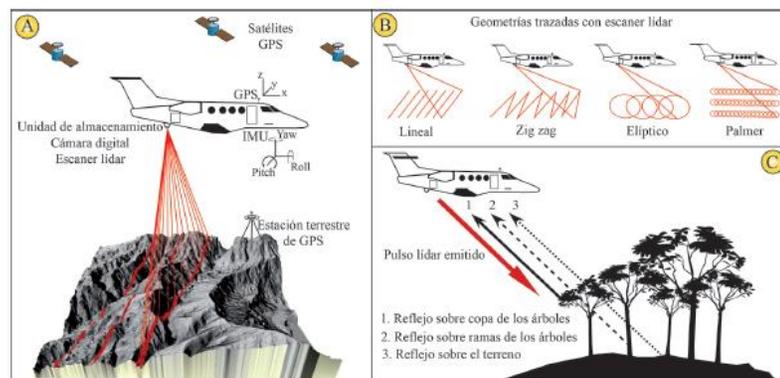


Figura 22 Lidar Funcionamiento

a) Esquema explicativo de funcionamiento de lidar aéreo. b) Geometrías que se pueden trazar con el escáner lidar durante un barrido c) Esquema sobre el orden de retorno de un pulso lidar emitido desde un avion

Fuente: (Ruiz, Garro, & Soto, 2014)

Los componentes de hardware principales de un sistema lidar incluyen un vehículo de recolección (avión, helicóptero, vehículo y trípode), sistema de escáner láser, GPS (Sistema de posicionamiento global) e INS (sistema de navegación por inercia). Un sistema INS mide la rotación, inclinación y encabezamiento del sistema lidar.

En la actualidad para la robótica móvil existe en el mercado Lidar de bajo costo, como ejemplo tenemos al Rplidar 360° Laser Scanner mostrado en la Figura 23, el cual es ideal para la localización y mapeo del robot, y posee un mecanismo que permite tener una rotación de 360° y así generar un escaneo en 2D como se muestra en la Figura 24.



Figura 23 Rplidar de RobotShop
Fuente: (RobotShop, 2018)

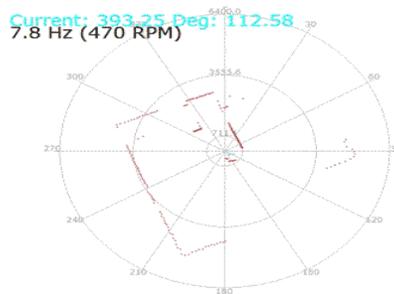


Figura 24 Escaneo 2D
Fuente: (RobotShop, 2018)

Las principales ventajas del uso de Lidar sobre otros sensores para tareas parecidas, radica en que la captura de información no depende de variables externas como temperatura, cantidad lumínica, entre otros, además de que, al usar la velocidad de la luz, permite obtener una gran cantidad de datos en intervalos cortos de tiempo, lo cual permite que el robot pueda moverse a gran velocidad mientras toma datos con una buena precisión. Sin embargo, presenta desventajas dependiendo del material a ser mapeado debido a su diferencia de reflectancia espectral. (Garzón Jaramillo & Obando Maldonado, 2016)

2.4. Localización

La localización es el proceso de estimar la posición de un robot móvil en un mapa que determina un sistema de coordenadas globales. Se puede dividir en dos, localización local y localización global, dependiendo de si se supone conocida la posición inicial del robot o si se la desconoce en el mapa (Gallardo López, 1999).

Por lo tanto, tenemos a la localización local que supone la posición del robot móvil conocida y se realiza un seguimiento para estimar la posición siguiente con la odometría del robot. Y la localización global que intenta estimar la posición del robot en el sistema de coordenadas globales con respecto al mapa, sin tener conocimiento de su posición inicial y utilizando la lectura de los sensores.

2.4.1. Localización Local

La localización local se puede formular como el problema de realizar un seguimiento del estado del robot para encontrar la posición estimada posterior partiendo desde una posición inicial, y corregir la odometría del robot mediante el uso de métodos de corrección de la localización. Para la estimación de la posición posterior se analiza la cinemática del robot y la odometría del mismo.

2.4.1.1. Cinemática del Robot

El análisis cinemático estudia el movimiento del robot sin considerar las fuerzas que intervienen en los movimientos y nos permite obtener ecuaciones de relaciones entre la posición y orientación de un punto del mismo para poder realizar un control a dicho punto.

A continuación, se analiza la cinemática de un robot móvil con una configuración tipo desplazamiento diferencial Skid-Steer, en el cual consta de cuatro ruedas motrices, dos ruedas de lado izquierdo y dos ruedas de lado derecho. Para el análisis de este modelo se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La masa del robot total se encuentra localizada en el centro geométrico del bastidor.
2. Las dos ruedas de cada lado rotan a la misma velocidad.
3. El robot camina por una superficie donde las cuatro ruedas siempre están en contacto a la vez.

En la Figura 25 se presenta la configuración Skid-Steer, donde se muestra un robot cuadrado, que cumple con las condiciones establecidas anteriormente, y se presenta los centros instantáneos de giros de cada lado con lo que se analiza la cinemática del robot.

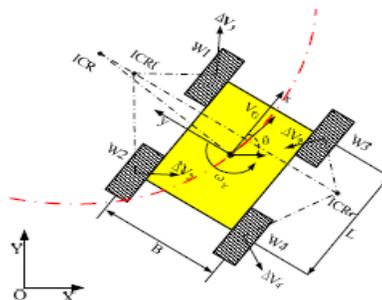


Figura 25 Cinemática de Skid-Steer

Fuente: (Wang, y otros, 2015)

Para cumplir con las consideraciones anteriores, primero se analiza las velocidades angulares de cada llanta (ω), regidas por la ecuación (2-2). Donde ω_1 es la velocidad de la rueda delantera izquierda, ω_2 es la velocidad de la rueda trasera izquierda, ω_3 es la velocidad de la rueda delantera derecha, ω_4 es la velocidad de la rueda trasera derecha.

$$\omega_L = \omega_1 + \omega_2 \quad \omega_R = \omega_3 + \omega_4 \quad (2-2)$$

En la cinemática directa por lo tanto tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} \omega_L r \\ \omega_R r \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Donde tenemos que la velocidad es una función de las velocidades angulares de cada lado y las distancias r que es el radio de las llantas del robot móvil.

En el movimiento del robot móvil con esta configuración, tenemos entonces la creación de Centros instantáneos de Rotación (ICR), donde existen 3, el centro instantáneo de rotación del lado izquierdo (ICR_L), del lado derecho (ICR_R), y del cuerpo del robot (ICR_G), donde cada centro instantáneo está representado por coordenadas x - y de la siguiente forma: (x_L, y_L) , (x_R, y_R) y (x_G, y_G) respectivamente (Wang, y otros, 2015).

Como la velocidad angular ω_z es la misma para todo el cuerpo del robot, tenemos las siguientes relaciones geométricas:

$$y_G = \frac{V_x}{\omega_z} \quad (2-4)$$

$$y_L = \frac{V_x - \omega_L r}{\omega_z} \quad (2-5)$$

$$y_R = \frac{V_x - \omega_R r}{\omega_z} \quad (2-6)$$

$$X_G = X_L = X_R = -\frac{V_y}{\omega_z} \quad (2-7)$$

Por lo cual se obtiene que la relación cinemática del robot es representada por:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J_\omega \begin{bmatrix} \omega_L r \\ \omega_R r \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Donde J_ω es la matriz de dependencia de ICR, pero como en el robot mostrado es simétrico, quiere decir que la coordenada X de todos los ICRs es igual a 0 ($X_G = X_L = X_R = 0$) y que $y_0 = y_L = -y_R$ entonces tenemos:

$$J_\omega = \frac{1}{2y_0} \begin{bmatrix} y_0 & y_0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Al reemplazar la ecuación (2-9) en (2-8) y conociendo que $V_L = \omega_L r$ y $V_R = \omega_R r$ tenemos como resultado final.

$$\begin{cases} V_x = \frac{V_L + V_R}{2} \\ V_y = 0 \\ \omega_z = \frac{V_R - V_L}{2y_0} \end{cases} \quad (2-10)$$

Donde el radio de curvatura R está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V_G}{\omega_z} = \frac{V_L + V_R}{-V_L + V_R} y_0 \quad (2-11)$$

Por último, se analiza gracias al coeficiente del ICR el valor de y_0 :

$$\chi = \frac{2y_0}{B} \text{ donde } \chi \geq 1 \quad (2-12)$$

Donde el coeficiente χ es igual a 1 cuando no existe deslizamiento (accionamiento diferencial ideal). Reemplazando la ecuación (2-12) en el modelo (2-10) y analizando por posición tenemos:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{\Delta S_L + \Delta S_R}{2} \\ \Delta \theta = \frac{\Delta S_R - \Delta S_L}{B} \end{cases} \quad (2-13)$$

2.4.1.2.Odometría

La odometría del robot o la estimación de la posición es muy necesaria para la navegación, porque gracias a esto se puede calcular cuánto se ha desplazado el robot en su trayectoria, a la vez que se puede estimar posición y orientación del robot respecto a un plano cartesiano global. (Siegwart & Nourbakhsh, 2011)

Para analizar la odometría del robot se parte desde el análisis anterior donde en la ecuación (2-13) obtenemos gracias a la cinemática del robot la ecuación de desplazamiento y giro. Para encontrar la posición respecto al plano cartesiano se puede describir la posición del robot con respecto al plano local como un vector con tres elementos que son la posición en (X, Y, θ) , por lo tanto tenemos la siguiente ecuación.

$$P_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{pmatrix}$$

Para describir el movimiento del robot en términos de movimientos de los componentes, será necesario utilizar la transformada de la posición a partir de un marco de referencia local a un marco referencial global. Por supuesto, el mapeo es una función de la posición actual del robot. Esta el

mapeo se logra usando la matriz de rotación ortogonal, que al ser la rotación en el plano z tenemos la ecuación (2-15):

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-15)$$

Por lo cual para obtener la posición del robot en el plano global tenemos la ecuación (2-16):

$$P_R = R(\theta) * P_I \quad (2-16)$$

Despejando la ecuación (2-15) en la ecuación (2-16) tenemos finalmente la siguiente ecuación:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ \theta_L \end{pmatrix} \quad (2-17)$$

La ecuación (2-17) nos presenta la odometría del robot, en un plano global. Si combinamos la ecuación (2-17) que nos presenta la odometría del robot y la ecuación (2-13) que nos presenta la cinemática del robot obtenemos una serie de ecuaciones presentadas en la Figura 26, que nos permite ubicar al robot en un plano global.

En la precisión en los cálculos de odometría existen algunos errores posibles entre ellos pueden ser los errores sistemáticos que son aquellos que pueden deberse a desalineación de las ruedas, fallas mecánicas, incertidumbre en el diámetro de las ruedas (ruedas diferentes, ruedas deformadas). Y los errores no sistemáticos en la medición son: resolución limitada de sensores, ruedas patinando, suelo desigual (Ortiz, 2014). Sin embargo, al ser imposible anticiparse en este tipo de errores se implementan correcciones probabilísticas, entre ellos los más usados son: Filtro Kalman, Filtro Kalman extendido, Filtro de partículas.

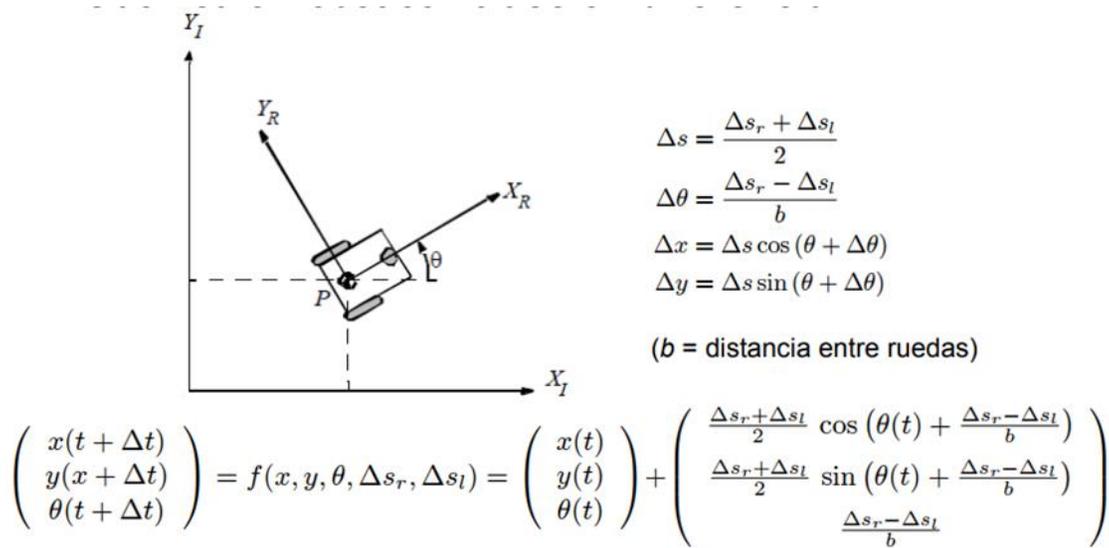


Figura 26 Odometría de un robot con desplazamiento diferencial

Fuente: (Ortiz, 2014)

2.4.2. Localización Global

La localización global se puede formular como el problema de estimar la posición del robot en un sistema de coordenadas globales con respecto a un mapa conocido, sin tener conocimiento de su posición inicial, y utilizando sensores para búsqueda de su posición global. Tradicionalmente se soluciona el problema de localización global con técnicas basadas en búsqueda.

La localización global se puede realizar por dos enfoques. El primer enfoque se llama localización de grillas. Utiliza un filtro de histograma para representar la creencia posterior. Una serie de problemas surgen cuando se implementa la localización de la grilla: con una grilla de grano fino, el cálculo requerido para una implementación ingenua puede hacer el algoritmo irrazonablemente lento. Con una grilla gruesa, la pérdida de información adicional a través de la discretización afecta negativamente al filtro y, si no se trata adecuadamente, incluso puede evitar que el filtro funcione.

El segundo enfoque es el algoritmo de localización Monte Carlo (MCL), posiblemente el enfoque más popular hasta la fecha. Utiliza filtros de partículas para estimar los posteriores sobre el robot poses. Se discuten una serie de deficiencias del MCL y técnicas para aplicar al problema del robot secuestrado y a entornos dinámicos. (Thrun, 2000).

A continuación, se presenta en la Tabla 2 una tabla comparativa de los métodos de localización mencionados con sus principales características.

Tabla 2

Comparación de Métodos de Localización Global

	Grilla Gruesa (Topológica)	Grilla Fina (Métrica)	MCL
Mediciones	Puntos de Referencia	Medidas Sin procesar	Medidas Sin procesar
Método Utilizado	Histograma	Histograma	Filtro de Partículas
Eficiencia (Memoria)	Buena	Mala	Buena
Eficiencia (Tiempo)	Buena	Mala	Buena
Fácil implementación	Fácil	Difícil	Muy Fácil
Resolución	Mala	Buena	Buena
Robustez	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Fuente: (Thrun, 2000).

2.4.3. Métodos probabilísticos de corrección de Localización

Los problemas principales en el caso de la localización de un robot son: la estimación errónea de la posición a posteriori, lo cual genera una sumatoria de errores mientras el algoritmo sigue su

funcionamiento, la pérdida de información de sensores u odometría, o el deslizamiento de las ruedas del robot que generan ruidos en la estimación del robot en la localización local.

Los errores mencionados anteriormente generan incertidumbre sobre la posición del robot, para esto se han desarrollado diferentes métodos de corrección de esa incertidumbre, utilizando métodos matemáticos para corrección de errores a través del sistema sensorial del robot móvil.

Los métodos probabilísticos de corrección de localización del robot móvil más utilizados son los siguientes:

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

2.4.3.1.Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo que tiene dos etapas, etapa de predicción y la etapa de corrección, mediante el cual se estima un estado, y a partir de una medición y obtención de datos se realiza la corrección del estado. (Kalman, 1960).

Este algoritmo resuelve el problema de estimación de manera óptima tomando en cuenta el ruido (incertidumbre), presente tanto en las variables medidas (valores de sensores), como las variables de control (valores de los actuadores) (Sánchez, Ordoñez, & Infante, 2013). Para la resolución mediante el filtro de Kalman se debe tener las siguientes consideraciones:

- Se supone que el sistema es lineal y se tiene una ecuación de estado que describe su comportamiento dinámico y una ecuación de medición que describe la relación entre las

variables de estado y la salida de los sensores, ambas ecuaciones deben estar escritas en tiempo discreto.

- El ruido de medición y el ruido del sistema deben ser independientes entre sí y con una media igual a cero y una distribución de probabilidad normal (Gaussiana).

En la etapa de predicción el filtro Kalman se ocupa por el modelo dinámico, el cual está definido por la ecuación de estado (2-18) y en la etapa de corrección el filtro se analiza con la ecuación de medición (2-19) (Kalman, 1960).

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (2-18)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2-19)$$

Donde:

$k \in Z$	Tiempo Discreto
$x_k \in \mathbb{R}^n$	Vector de estado del sistema
$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Matriz de transición de estado
$u_k \in \mathbb{R}^m$	Vector de Control
$B \in \mathbb{R}^{n \times m}$	Matriz de Control
$w_k \in \mathbb{R}^n$	Ruido del sistema (de control)
$z_k \in \mathbb{R}^l$	Vector de mediciones
$H \in \mathbb{R}^{l \times n}$	Matriz de medición
$v_k \in \mathbb{R}^l$	Ruido de medición

En los ruidos de w_k y v_k son vectores que contienen variables aleatorias en cada uno de sus componentes donde tienen covarianza Q y R respectivamente (Kalman, 1960), donde:

$$Q \in \mathbb{R}^{n \times n} \text{ y } R \in \mathbb{R}^{l \times l}$$

$$p(w_k) = N(0, Q) \text{ y } p(v_k) = N(0, R)$$

Al tener todas estas variables establecidas se realiza el algoritmo de filtro de Kalman:

En la etapa de predicción del algoritmo se obtiene una estimación “a priori” del estado en el instante k a la cual nos referimos como x_k . Esta estimación a priori se realiza con base en el modelo dinámico del sistema tomando en cuenta la estimación del instante anterior, pero sin tomar en cuenta los datos de sensores.

En la fase de corrección del algoritmo se obtiene la estimación “a posteriori” del estado en el instante k a la cual nos referimos como \widehat{x}_k . La estimación “a posteriori” aprovecha la estimación “a priori” y la corrige usando la información ruidosa de sensores.

El algoritmo genera una buena estimación al utilizar estas dos etapas. Si sólo se utilizará la dinámica del sistema, entonces habría una acumulación paulatina del error y crecería la incertidumbre, mientras que, si sólo usamos la información de los sensores, estaríamos sujetos a saltos bruscos de la estimación causada por el ruido de medición cuando el sistema se encuentra estático. En la Figura 27 se presenta el algoritmo del filtro de Kalman de manera gráfica (Kalman, 1960).

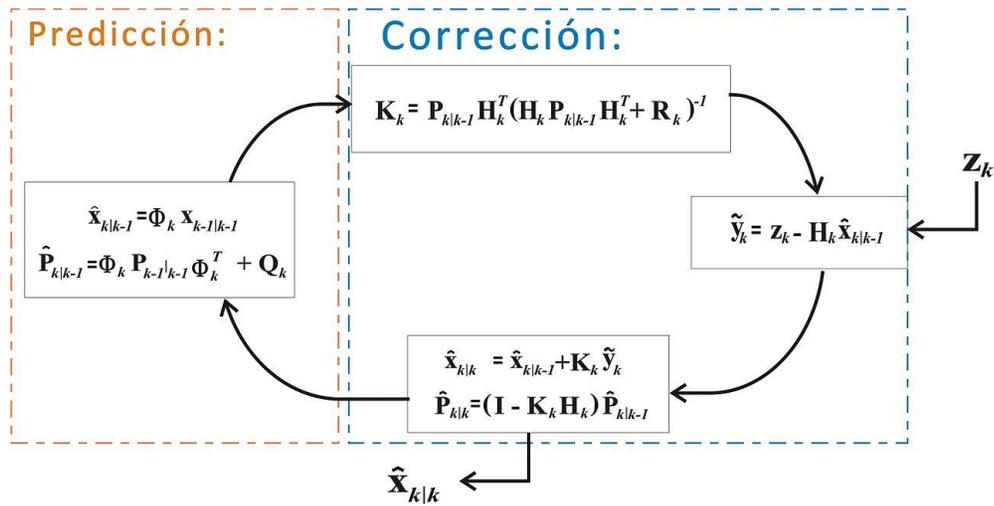


Figura 27 Algoritmo de Filtro de Kalman
Fuente: (Wikipedia, 2016)

A continuación, se presenta el algoritmo de forma escrita:

Algoritmo Filtro de Kalman

Fase de predicción

$$\widehat{\mathbf{x}}_k^- = A \widehat{\mathbf{x}}_{k-1} + B u_{k-1}$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$$

Fase de corrección

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\widehat{\mathbf{x}}_k = \widehat{\mathbf{x}}_k^- + K_k (z_k - H \widehat{\mathbf{x}}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

2.4.3.2. Filtro de Kalman Extendido

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

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 con la única variante que al ser un sistema no lineal el sistema debe estar representado en

forma de funciones diferenciables como se muestra en la imagen (2-20) y (2-21). El método de resolución es igual al del filtro de Kalman.

$$\dot{x}_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k \quad (2-20)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (2-21)$$

También se toma en cuenta que se linealiza el sistema de forma que la ecuación de Proceso (2-22) y la ecuación de medida (2-23) queda representada de la siguiente forma.

Ecuación de Proceso:

$$A_k = \frac{da}{dx}(\widehat{x}_{k-1}, u_k) \quad (2-22)$$

Ecuación de medida:

$$H_k = \frac{dh}{dx}(\widehat{x}_k^-) \quad (2-23)$$

2.4.3.3. Filtro de partículas

El filtro de partículas es un algoritmo para estimar una función de densidad de probabilidad que evoluciona bajo un sistema dinámico estocástico, utilizando un conjunto de muestras aleatorias denominadas partículas, las cuales representan los posibles estados de un sistema dinámico en el espacio de estados, haciendo uso de ecuaciones de recurrencia bayesianas (Díaz Abreu, 2015).

El objetivo del filtro de partículas es evaluar una función de densidad de probabilidad $P(x_k|Z_k)$ del vector de estados x_k , dado un conjunto $Z_k = \{z_i\}_{i=1}^k$ de observaciones hasta el tiempo k . La calidad o importancia de la i -ésima partícula del vector de estados $x_k^{(i)}$, es medida por medio de un peso $w_k^{(i)}$ asociado a ella.

En el algoritmo de filtro de partículas se puede encontrar tres puntos importantes. El primero es la fase donde se estima un estado hipotético de $x_t^{[m]}$, donde se analiza mediante la variable de control u_t , un muestreo con una distribución de estado $p(x_t|u_t, x_{t-1})$. El segundo punto importante consiste en encontrar el factor de importancia $w_t^{[m]}$, el cual se encuentra analizando la medida del sensor z_t con la partícula $x_t^{[m]}$, que es, $w_t^{[m]} = p(z_t|x_t^{[m]})$. El tercer punto importante consiste en un re muestreo o re muestreo por importancia, para reemplazar a las muestras que poseen una probabilidad baja de estimación por partículas de probabilidad alta.

Algoritmo Filtro de Particula (X_{t-1}, u_t, z_t):

1: $\bar{X}_t = X_t = 0$ (inicialización)

2: Desde $m = 1$ to M Hacer:

3: muestrear $x_t^{[m]} \sim p(x_t|u_t, x_{t-1}^{[m]})$

4: $w_t^{[m]} = p(z_t | x_t^{[m]})$ se analiza el peso de la muestra

5: $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$

6: Terminar Desde

7: Desde $m = 1$ to M Hacer:

8: dibujar $i \in \{1, \dots, N\}$ con probabilidad $w_t^{[i]}$

9: Añadir $x_t^{[i]}$ a X_t

10: Terminar Desde

11: Retornar X_t

Donde: $X_t =$ Posición Estimada; $u_t =$ Variable de Control; $z_t =$ Medida ;

$M =$ Numero de muestras

2.5. Control de Movimiento

El robot para cumplir con las trayectorias y la localización del robot, debe aplicar acciones de control en sus actuadores; para ellos se debe tomar en cuenta el tipo de actuadores del robot, y aplicar técnicas de control como PID, Fuzzy, en el caso de motores DC, o control de pulsos en el caso de motor a Pasos.

2.5.1. Motores DC

Los motores DC como se muestran en la Figura 28 no pueden ser posicionados y/o enclavados en una posición específica a menos que se los relacione con electrónica especializada para este fin. Estos simplemente giran a la máxima velocidad y en el sentido que la alimentación aplicada se los permite. Para tener control de movimiento con este tipo de motor, es necesario aplicar teorías de control como PID, Fuzzy, y electrónica especializada.



Figura 28 Motor DC

2.5.2. Motores a Pasos

Los motores a pasos como se muestra en la Figura 29 es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de los pulsos de control en sus entradas.

Se pueden mover un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° , utiliza electrónica especializada para el control de sus pulsos (step).



Figura 29 Motor a Pasos

2.6. Mapeo y Localización Simultáneo (SLAM)

El proceso de SLAM se fundamenta en una sucesión de pasos donde el objetivo es utilizar la información del medio ambiente donde se mueve el robot para establecer su posición y a la vez tomar datos de las distancias con los objetos para mapear el lugar. Dado que la odometría del robot frecuentemente tiene fallas se utiliza métodos que corrigen la posición del robot, como se explicó en el punto 2.4.3. Y como apoyo se puede añadir otros sensores como es el caso de láser para realizar la corrección.

El problema de SLAM utiliza un mapa estocástico que a diferencia de la localización a partir de un mapa a priori se debe mantener y actualizar a medida que el robot está realizando el mapa automáticamente, en la Figura 30 se muestra un esquema que incorpora la construcción del mapa manteniendo la posición (Berrío Pérez, 2012).

En robótica existe diferentes soluciones al problema de SLAM con enfoques probabilísticos como: Filtro de Kalman (KF), Filtro de Partículas (PF) y la maximización de la expectativa (EM). Las tres técnicas son derivaciones matemáticas de la regla de Bayes recursiva. La principal razón de estas populares técnicas probabilísticas es el hecho de que el mapeo del robot se caracteriza por poseer incertidumbre y el ruido en los sensores.



Figura 30 Desarrollo del proceso de localización y mapeo simultáneo
Fuente: (Berrío Pérez, 2012)

En la Tabla 3 tenemos una lista de ventajas y desventajas de las diferentes estrategias presentadas.

Tabla 3

Lista de ventajas y desventajas de las diferentes estrategias de SLAM

Método	Ventajas	Desventajas	Observaciones
KF/EKF	Alta convergencia, maneja incertidumbre	Supuesto Gaussiano Lento en mapas de varias dimensiones	Incremental, No maneja correspondencias, Puede caer en mínimos locales
PF	Maneja no linealidades, Maneja ruido no gaussiano	Crece en complejidad, Solo tiene éxito en localización	Sufre degeneración debido a la dependencia de datos pasados
EM	Óptimo para la construcción de mapas, Resuelve asociación de datos	Ineficiente por el crecimiento del costo, Inestable para grandes escenarios Solo tiene éxito en construcción de mapas	Maneja mínimos locales, No apto para ambientes dinámicos

Fuente: (Berrío Pérez, 2012)

Como una optimización de la solución al problema de SLAM se puede tomar a Héctor Slam utilizado en ROS, el cual consiste en combinar un sistema SLAM 2D basado en integración de escaneos láser (LIDAR) en un mapa plano y un sistema integrado de navegación 3D basado en una medición inercial unidad (IMU), que incorpora la información 2D del subsistema SLAM como una posible fuente de ayuda información se puede adquirir una iteración entre todos los campos como se muestra en la Figura 31 (Kohlbrecher, Von Stryk, Meyer, & Klingauf, 2011) . Mientras que SLAM generalmente se ejecuta en tiempo real suave desencadenado por las actualizaciones del dispositivo de escáner láser, en la solución de navegación 3D completa se calcula en tiempo real y generalmente forma parte del sistema de control del vehículo.

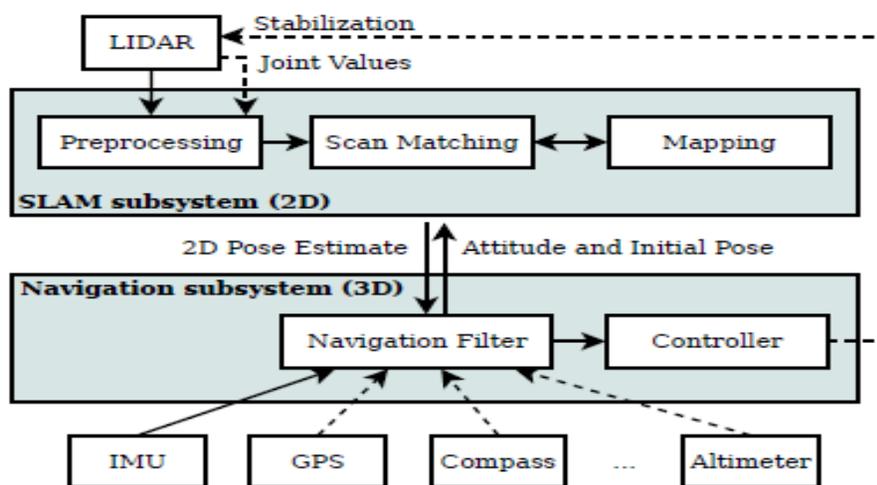


Figura 31 Descripción general del sistema de mapeo y navegación
Fuente: (Kohlbrecher, Von Stryk, Meyer, & Klingauf, 2011)

2.7. Recuperación de la Ubicación del robot

Como se mostró en el punto 2.4.2 gracias a la Tabla 2 el método de Localización de Monte Carlo (MCL), es el método más utilizado y que posee buenos resultados, a continuación, se presenta el algoritmo de Monte Carlo y variantes utilizadas en este método.

2.7.1. Localización de Monte Carlo (MCL)

La localización de Monte Carlo (MCL) se basa en un filtro de partículas el cual se muestra en el literal 2.4.3 de este proyecto, con la diferencia que en la línea 3 donde se muestran las partículas, el algoritmo de Monte Carlo agrega una función del modelo del movimiento del robot, el cual es la probabilidad del movimiento del robot con respecto a sus variables de control o su odometría $x_t^{[m]} = \text{modelo de partículas en movimiento} (u_t, x_{t-1}^{[m]})$ (Thrun, 2000).

Para explicar el funcionamiento del algoritmo se presenta en la Figura 32 un ejemplo de localización global utilizando algoritmo de Monte Carlo donde se observa como un robot mediante la toma de cada medida genera nuevas muestras importantes dependiendo del peso de la partícula. Primero se inicia un muestreo aleatorio en todo el mapa Figura 32.a; Después se analiza el peso de cada muestra, en donde se observa que existe posiciones donde la probabilidad de que el robot se encuentre en ese punto es muy alta, por lo tanto el peso de la muestra $w_k^{[m]}$, es alta, Figura 32.b. Luego se re muestrea el mapa donde a las posiciones donde las partículas tenían poco peso de muestra, se descartan y se agregan partículas a donde existía un gran peso de muestra Figura 32.c. El proceso de la Figura 32.b y Figura 32.c. se repite en la Figura 32.d. y Figura 32.e. respectivamente, donde se puede ver que mientras más iteraciones posea el método mayor será la precisión de la posición del robot (Thrun, 2000).

Por lo tanto, el algoritmo de Localización de Monte Carlo queda de la siguiente forma:

Algoritmo MCL ($X_{t-1}, u_t, z_t, \text{mapa}$):

-
- 1: $\bar{X}_t = X_t = 0$ (inicialización)
 - 2: Desde $m = 1$ to M Hacer:
 - 3: $x_t^{[m]} = \text{modelo de movimiento de cada muestra}(u_t, x_{t-1}^{[m]})$
 - 4: $w_t^{[m]} = (z_t, x_t^{[m]}, \text{mapa})$ se analiza el peso de la muestra
 - 5: $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$
 - 6: Terminar Desde
 - 7: Desde $m = 1$ to M Hacer:
 - 8: dibujar $i \in \{1, \dots, N\}$ con probabilidad $w_t^{[i]}$
 - 9: Añadir $x_t^{[i]}$ a X_t
 - 10: Terminar Desde
 - 11: Retornar X_t
- Donde: $X_t = \text{Posición Estimada}$; $u_t = \text{Variable de Control}$; $z_t = \text{Medida}$;
 $M = \text{Numero de muestras}$

2.7.2. Adaptación de Localización de Monte Carlo (AMCL)

Una variante del Monte Carlo es la adaptación y aumento de muestras al algoritmo el cual consiste en generar muestras aleatorias para evitar errores posibles en las soluciones finales del algoritmo. Es decir, si la medición es errónea en un intervalo de tiempo y el robot se posiciona erróneamente, mediante la creación de muestras aleatorias por el mapa se puede recuperar la ubicación del robot, esto es también usado en el caso del Rapto del robot.

Para esta variante del algoritmo de Monte Carlo original, es necesario tener un factor llamado término promedio de la probabilidad, el cual nos permite estimar si la posición actual del robot es una posición probable o una posición errónea. El parámetro $0 \leq \alpha_{slow} \ll \alpha_{fast}$ donde es un factor exponencial del filtro que estima el término largo y el término corto.

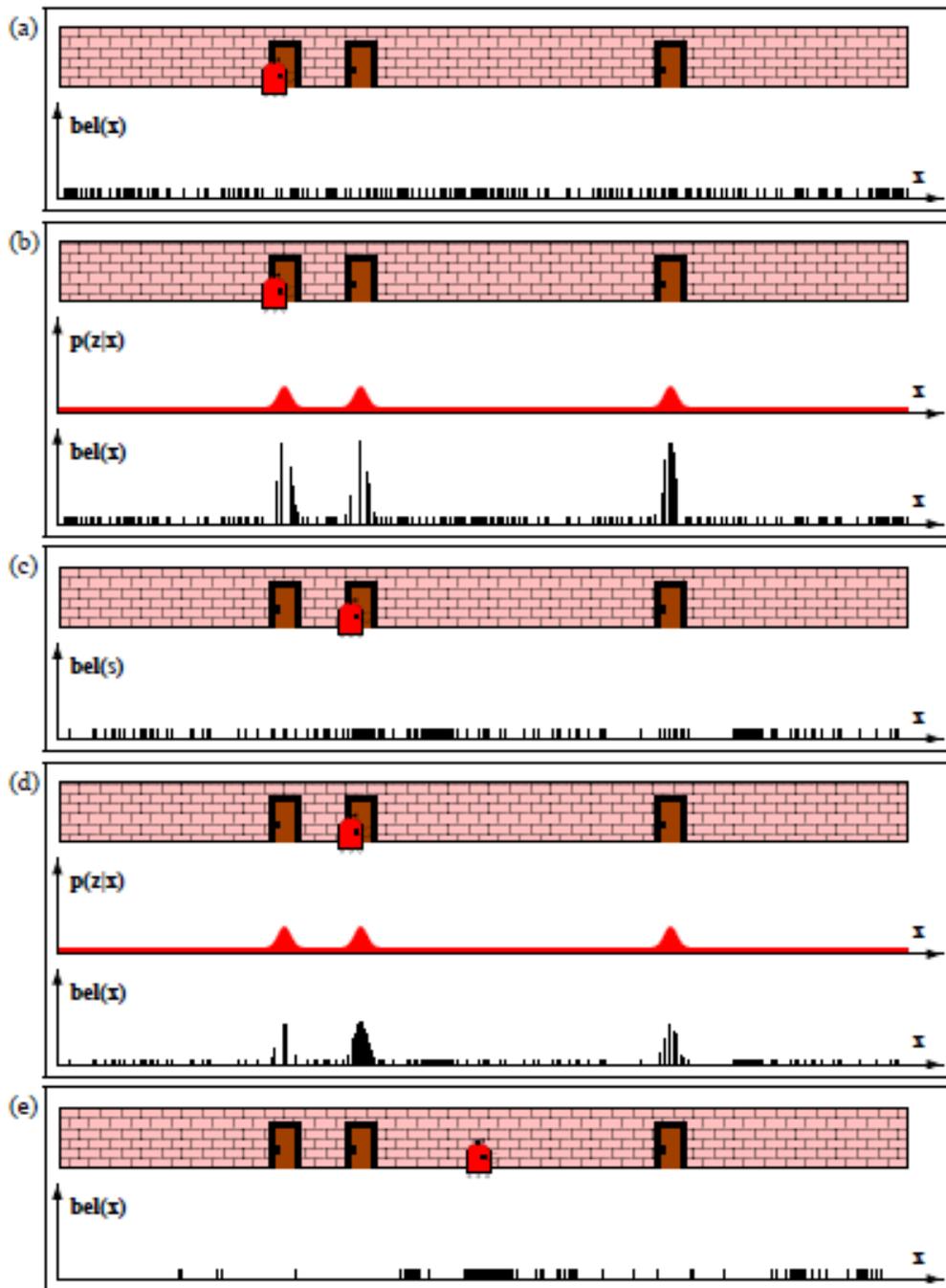


Figura 32 Ejemplo de Funcionamiento de Monte Carlo
Fuente: (Thrun, 2000)

Al implementar estos análisis el algoritmo de Monte Carlo nos queda de la siguiente forma.

Algoritmo AMCL ($X_{t-1}, u_t, z_t, mapa$):

- 1: $\bar{X}_t = X_t = 0$ (inicialización)
- 2: Desde $m = 1$ to M Hacer:
- 3: $x_t^{[m]} = \text{modelo de movimiento de cada muestra}(u_t, x_{t-1}^{[m]})$
- 4: $w_t^{[m]} = (z_t, x_t^{[m]}, \text{mapa})$ se analiza el peso de la muestra
- 5: $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$
- 6: $\omega_{avg} = \omega_{avg} + \frac{1}{M} w_t^{[m]}$
- 7: Terminar Desde
- 8: $\omega_{slow} = \omega_{slow} + \alpha_{slow} (\omega_{avg} - \omega_{slow})$
- 9: $\omega_{fast} = \omega_{fast} + \alpha_{fast} (\omega_{avg} - \omega_{fast})$
- 10: Desde $m = 1$ to M Hacer:
- 11: Con probabilidades maximas de $(0 - 1.0 - \frac{\omega_{fast}}{\omega_{slow}})$ hacer:
- 12: añadir randomicamente poses de X_t
- 13: Caso contrario:
- 14: dibujar $i \in \{1, \dots, N\}$ con probabilidad $w_t^{[i]}$
- 15: Añadir $x_t^{[i]}$ a X_t
- 16: Terminar Desde
- 17: Retornar X_t

Como se observa en la línea 6, 8 y 9 se tiene un factor que en la línea 11 se analiza para tener una decisión de crear muestras o re muestrear las anteriores.

2.7.3. Método del re muestreo (KDL-Sampling)

La idea principal de este método de re muestreo KDL-sampling consiste en limitar el error introducido por la representación basada en muestras del filtro de partículas. Para derivar este límite, suponemos que la verdadera posición posterior está dada por una distribución constante discreta a trozos, como un árbol de densidad discreta o un histograma multidimensional. Y para tal representación, podemos determinar el número de muestras para que la distancia entre la estimación de máxima verosimilitud (MLE) basada en las muestras y la verdadera posterior no exceda un umbral pre especificado ϵ (Fox, 2002).

La derivación se puede resumir si elegimos las cantidades de la muestra como la Ecuación (2-24):

$$n = \frac{1}{2\epsilon} x_{k-1,1-\delta}^2 \quad (2-24)$$

Donde una buena aproximación tenemos a la ecuación (2-25)

$$n = \frac{k-1}{2\epsilon} \left\{ 1 - \frac{2}{9(k-1)} + \sqrt{\frac{2}{9(k-1)}} z_{1-\delta} \right\}^3 \quad (2-25)$$

Donde:

$z_{1-\delta}$ es el cuantil superior de $1 - \delta$ de la distribución estándar normal $N(0,1)$

y ϵ es el límite superior de la distancia $K - L$

2.8. Resumen

En los sistemas de locomoción del robot móvil de tipo rueda; la configuración diferencial es la más utilizada para la robótica, ya que depende de la diferencia de velocidades de sus ruedas laterales, es un sistema con un control más sencillo y una capacidad de acoplamiento de actuadores más simple.

Para tener una buena navegación de un robot se debe considerar cuatro puntos principales que son: la percepción, la localización, la planificación y el control de movimiento.

Para la percepción que es la interpretación de datos que se suministra por sensores para extracción de información útil, el robot puede obtener datos de: un sonar, un lidar o incluso de una Kinect; ya que los tres permiten obtener una medida de distancias.

La localización local consiste en encontrar la posición del robot mediante una estimación a posteriori conociendo la estimación inicial para esto se utiliza la cinemática y la odometría del robot

En la localización global gracias a tablas comparativas se tiene que el algoritmo de localización de Monte Carlo es un algoritmo robusto y con mayor facilidad que los otros dos que son grilla gruesa y grilla fina.

Los métodos probabilísticos para corrección de la localización son: Filtro Kalman, Filtro Kalman Extendido y filtro de partículas, del cual los dos primeros consisten en una es predicción y corrección del Estado. Mientras que el filtro de partículas consiste en evaluar en función de una densidad la probabilidad del vector de estado

Con respecto a los actuadores que se puede utilizar en la robótica para estos prototipos son motores DC y Motores a Pasos, siendo estos últimos más fáciles de controlar con respecto a su posición.

El algoritmo de localización de Monte Carlo posee algunas variantes, como por ejemplo la adaptación y aumento de muestras al algoritmo y también el método de re muestreo KDL-sampling, que optimizan al algoritmo para la resolución del problema del robot secuestrado (Kidnapped Robot Problem).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y DISEÑO

El capítulo se centra en la metodología utilizada para el diseño del robot móvil que realiza Slam y permite recuperar la ubicación del robot con el problema del Rapto (Kidnapped Robot Problem). El diseño se basa en el modelo para diseño y desarrollo de productos de (Ulrich & Eppinger, 2012), que consiste en realizar un diseño analizando todos los posibles conceptos y seleccionando el mejor mediante una tabla de comparación según sus ventajas y desventajas de diseño que cumpla las especificaciones técnicas requeridas para el producto. Este diseño empieza por definir el concepto del producto, analizando las necesidades y características técnicas, luego se plantea alternativas de diseño con base a la estructura funcional para mediante una evaluación utilizando matrices de selección de conceptos tener una definición del diseño a nivel sistema y finalmente el diseño a nivel detalle de cada módulo.

3.1. Definición de Necesidades

La importancia de determinar las necesidades del usuario reside en definir las características y especificaciones técnicas del producto final, para con esto desarrollar el diseño final.

En este subcapítulo se expone ciertas necesidades tanto básicas como avanzadas que para un diseño óptimo se tienen que tomar en cuenta. A continuación, en la Tabla 4 se presenta algunas necesidades o requerimientos para posterior a ello generar posibles soluciones para el proyecto.

Estas necesidades de la tabla nos permiten aclarar los puntos a los cuales se centrará el diseño del robot móvil con el fin de brindar una solución óptima y se clasifica también en la tabla los conceptos como requerimientos (R) o deseos (D).

3.2. Definición de las características técnicas

Al ya tener definidas las necesidades del usuario para la plataforma robótica móvil de interiores se definen las características técnicas, que son las necesidades del usuario en un lenguaje técnico y de preferencia medible. De esta manera, al cumplir con las métricas podemos obtener la satisfacción del usuario.

Tabla 4

Tabla de Necesidades de la plataforma robótica móvil

Concepto	N.-	R/D	Necesidad
Estructura	1	D	Estructura Liviana
	2	D	Implementar componentes pequeños
	3	D	Robot móvil con estructura redonda
	4	R	Robot móvil de tamaño pequeño
	5	R	Estabilidad estática y dinámica
	6	R	Capacidad de subir hasta 5° de elevación
Función	7	R	Diseño para interiores de estructuras
	8	D	Velocidad de desplazamiento relativamente Rápido
	9	R	Sistema Autónomo
	10	R	Capacidad de realizar SLAM
	11	D	Autonomía por tiempo prudencial
	12	R	Sistema inalámbrico
	13	R	Capacidad de recuperar la ubicación

Control	14	R	Control de motores y posición
	15	R	Adquisición de datos de distancia
	16	R	Tecnología de código abierto
Comunicación y monitoreo	17	R	Comunicación humano – máquina
	18	R	Lectura de Datos y Resultados
Costos	19	D	Mantener los costos más bajos posibles

En la Tabla 5 se encuentra de manera detallada las características técnicas necesarias analizando las necesidades del usuario.

Tabla 5
Características técnicas del producto

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
1,3,4,5,6,7	Forma del Robot	Forma Circular	----
1,3,4,5,6,7	Medidas del robot móvil	$R < 200$	mm
1,2,4,5	Peso del Robot	$P < 8$	Kg
3,4	Altura del robot	$H < 150$	mm
3,5,6,7	Altura mínima de la base al suelo	$h > 10$	mm
2,5,7,14,18	Número mínimos de motores	2	Unidades
1,3,4,5,6	Número mínimos de apoyos	3	Unidades

Continua →

8	Velocidad de desplazamiento	$V > 10$	cm/s
5	Carga que soporta	1	Kg
9,11	Duración mínima de batería	$T > 1$	Hora
10,12,13,15,18	Sistema de comunicación	Inalámbrico	-----
16	Tipo de código	Abierto	-----
17	Interfaz gráfica	SI	-----
19	Costo de producción	costo < 600	\$

3.3. Definición de la estructura funcional

Para el desarrollo del producto según Ulrich & Eppinge es importante determinar la estructura funcional, Figura 33 o forma de trabajo que posee el robot móvil, para ello se debe desglosar la operatividad del producto y trabajar en módulos de diseño, como se presenta en la Figura 34. Estos módulos permiten distribuir las funciones operacionales del robot, para trabajar con un pensamiento de ingeniería mecánica, es decir una sinergia de varias ingenierías en cada función del robot.

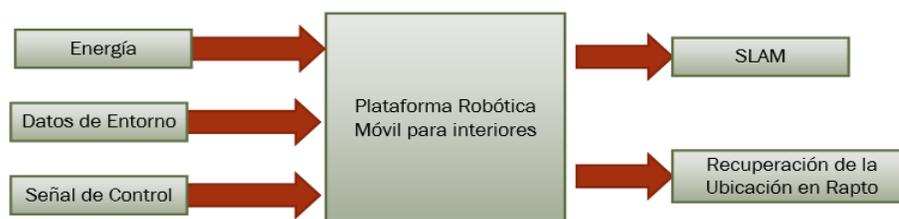


Figura 33 Estructura Funcional

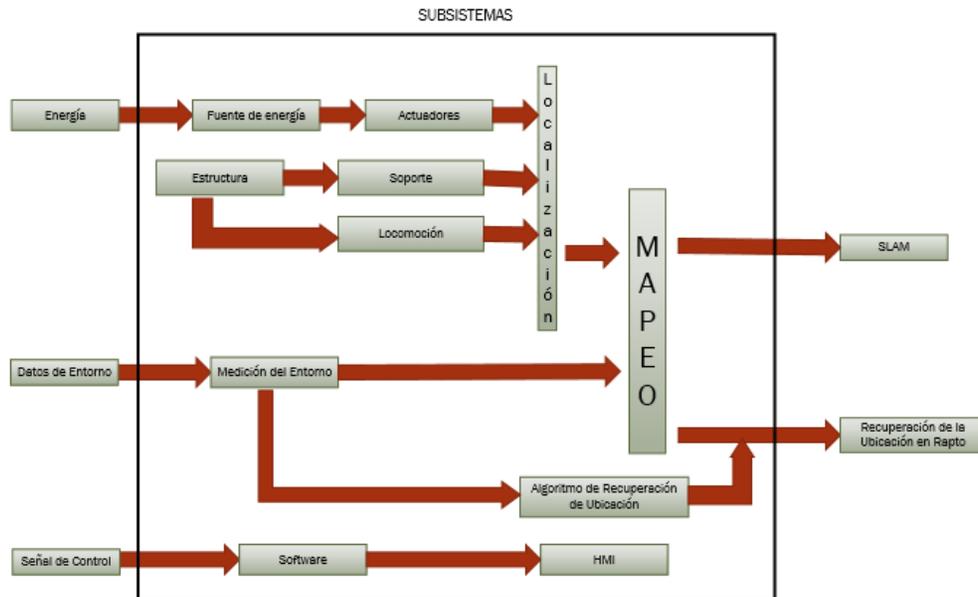


Figura 34 Sistema conjunto de Estructura Funcional

En la Figura 35 se muestra la agrupación de las funciones de la plataforma móvil para la generación de los subsistemas. Se obtienen 7 subsistemas con los cuales trabajar en los próximos pasos y se presentan en la Tabla 6.

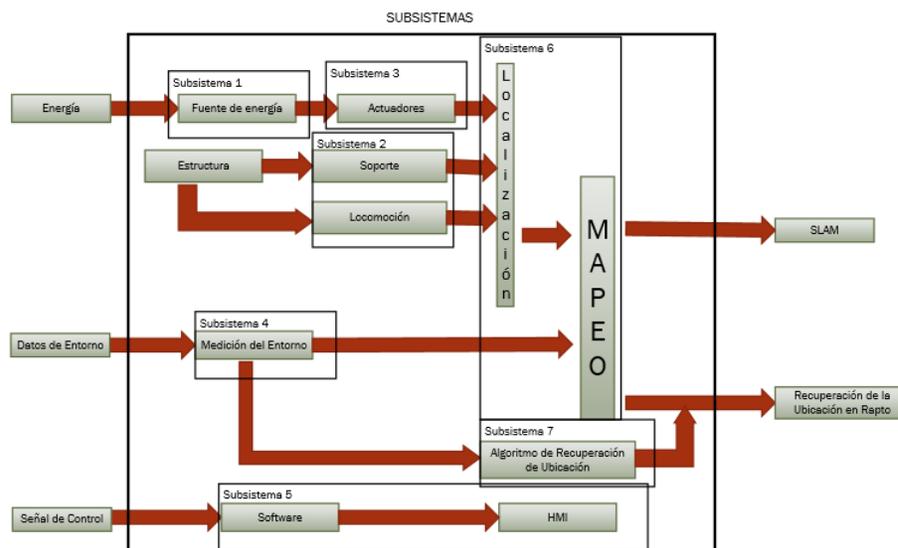


Figura 35 Subsistemas de Plataforma Móvil

Tabla 6*Subsistemas de Plataforma Móvil*

<i>Número</i>	<i>Subsistema</i>	<i>Función</i>
1	Fuente energética	Fuente energética
2	Soporte y Locomoción	Principio de desplazamiento
3	Tracción	Tipo de Actuadores y Circuito de control y potencia
4	Medición de Entorno	Selección de Sensores de medición de entorno
5	Software y Controlador	Software, HMI y controlador
6	SLAM	SLAM
7	Recuperación de Ubicación	Algoritmo de Recuperación de ubicación

El proceso de diseño de (Ulrich & Eppinger, 2012), requiere de dos etapas: la primera consiste en enlistar alternativas de diseño de cada módulo para luego seleccionarlas mediante una evaluación, y la segunda es el diseño final utilizando las alternativas ganadoras del proceso anterior.

3.3.1. Subsistema 1: Fuente Energética

El subsistema de fuente energética de la plataforma robótica móvil corresponde a encontrar la mejor fuente energética que cumpla con parámetros de relación peso y tamaño, potencia energética capaz de entregar la fuente, autonomía del robot y costo de mercado. Este subsistema combinado con el Subsistema 2 y 3 permitirá obtener la capacidad de la fuente energética.

3.3.2. Subsistema 2: Soporte y Locomoción

El subsistema de soporte se encarga de analizar la mejor forma, distribución de los elementos, material y dimensiones del bastidor del robot, analizando criterios de Peso, Forma, Tamaño y Estabilidad.

El subsistema de locomoción corresponde a encontrar el tipo de locomoción de la plataforma, analizando criterios como estabilidad, Velocidad mínima lineal, Peso.

3.3.3. Subsistema 3: Tracción

El subsistema de Tracción se encarga de establecer los actuadores y su control cinemático y dinámico de los motores, tomando criterios como costo, peso, torque, dispositivo de control.

3.3.4. Subsistema 4: Medición de Entorno

El subsistema de medición de entorno corresponde a encontrar el mejor dispositivo para sensar el entorno tomando distancias entre el robot y los obstáculos; para ello se analiza criterios como Eficiencia, Precisión, Costo, capacidad de adaptarse a controladores del mercado y programas del mercado. Con esta medición del entorno y uniendo los subsistemas 5, 6 y 7 con sus respectivos resultados permitirán resolver el problema planteado.

3.3.5. Subsistema 5: Software y Controlador

El subsistema de software se encarga de buscar un software libre con el criterio de diseño de documentación de su uso, amplia lista de repositorios, fácil uso, gratuito, puede generar un HMI interactivo para el usuario y permita tener autonomía con un sistema de comunicación inalámbrico.

El subsistema de controlador se encarga de buscar un controlador que cumpla los criterios de diseño de capacidad de utilizar software anteriormente planteado, Costo, Fácil uso, documentación y capacidad de realizar comunicación inalámbrica.

3.3.6. Subsistema 6: SLAM

El subsistema SLAM se encarga de encontrar un método para realizar el mapa y la localización simultánea del robot, con criterios de bajo procesamiento del controlador, sencillo, buenos resultados experimentales. Este subsistema se conecta con el subsistema 4 y 5 para análisis.

3.3.7. Subsistema 7: Recuperación de la ubicación

En el subsistema de recuperación de la ubicación se encarga de analizar el mejor método de recuperación de la ubicación en caso de raptó (Kidnapped Robot Problem) con criterios de diseño de bajo procesamiento del controlador, sencillo, bajo tiempo de convergencia y bajo error en la solución al problema.

3.4. Evaluación y selección de alternativas.

Se analizará en cada uno de los subsistemas las alternativas que permitan cubrir las necesidades y requerimientos planteados para el presente proyecto. Se analizará cada alternativa mediante tablas de selección de conceptos.

3.4.1. Subsistema 1: Fuente Energética

Para la obtención de alternativas de la Fuente Energética se consideran los requerimientos iniciales como permita autonomía del robot y proporcione una potencia energética mínima de 5Ah.

Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Fuente Energética se consideran 3 factores importantes para su selección. Los factores son los siguientes:

- Peso y Tamaño
- Costo
- Fácil acceso en el mercado.

En la Tabla 7 se realiza la ponderación de los 3 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 7

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 1

CRITERIO	Peso y Tamaño	Costo	Mercado	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
Peso y Tamaño		2,5	0	3,5	19%
Costo	2,5		0	3,5	19%
Mercado	5	5		11	61%
Sumatoria Total				18	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Fuente energética. Al buscar baterías de 12V de voltaje DC y que permitan tener autonomía al robot (sin cableado externo) se logran analizar 2 alternativas que son:

- **Alternativa 1: Baterías con ácido:** Son baterías de alta confiabilidad, utilizadas comúnmente en motocicletas, son económicas comparadas con otras y de fácil acceso al mercado. Una de las desventajas de esta batería es su peso y tamaño, midiendo aproximadamente 10cm x 5cm, y un peso de 2Kg, en la Figura 26 se puede observar la batería.



Figura 36 Batería con ácido

- **Alternativa 2: Baterías tipo Lipo:** Son baterías de alta confiabilidad, utilizadas comúnmente en drones, son costosas y las baterías especiales de 12V, se las encuentra en pocos lugares del mercado, pero son muy livianas y pequeñas en comparación con las otras. En la Figura 27 se tiene un ejemplo de este tipo de batería.

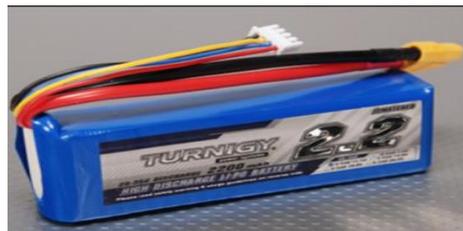


Figura 37 Batería tipo Lipo

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. En la Tabla 8 Tenemos la Ponderación de Peso y tamaño, en la Tabla 9 la Ponderación de Costo y en la Tabla 10 la Ponderación de Mercado.

Tabla 8

Ponderación de las alternativas con el criterio de Peso y Tamaño

Peso y Tamaño	Alternativa 1	Alternativa 2	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	1	14%
Alternativa 2	5		6	86%
Sumatoria Total				7 100%

Tabla 9*Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	6	86%
Alternativa 2	0		1	14%
Sumatoria Total				7 100%

Tabla 10*Ponderación de las alternativas con el criterio de Mercado*

Mercado	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	6	86%
Alternativa 2	0		1	14%
Sumatoria Total				7 100%

En la Tabla 11 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 11*Selección de concepto de Fuente Energética*

CRITERIO	Peso y Tamaño	Costo	Mercado	ξ Total	PONDERACIÓN
Alternativa 1	3%	17%	52%	0,718253968	72%
Alternativa 2	17%	3%	9%	0,281746032	28%
Sumatoria					1 100%
Total					

De la Tabla 11 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 1 lo cual corresponde a una Batería con ácido.

3.4.2. Subsistema 2: Soporte y Locomoción

Para la obtención de alternativas de Soporte y Locomoción se consideran los requerimientos iniciales, donde el robot móvil necesita tener un buen movimiento, ser estable, Tener forma redonda, y tener un mínimo de 2 motores y 3 apoyos.

Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Soporte y Locomoción se consideran 5 factores importantes para su selección. Los factores son los siguientes:

- Peso y Tamaño
- Costo
- Estabilidad
- Robusto ante ruido por deslizamiento
- Facilidad de control y Movilidad.

En la Tabla 12 se realiza la ponderación de los 5 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 12

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 2

CRITERIO	Peso y Tamaño	Costo	Estabilidad	Robustez	Movilidad	Σ +1	PONDERACIÓN
Peso y Tamaño		2,5	0	5	0	8,5	15%
Costo	2,5		0	2,5	0	6	11%
Estabilidad	5	5		5	2,5	18,5	34%
Robustez	0	2,5	0		0	3,5	6%
Movilidad	5	5	2,5	5		18,5	34%
Sumatoria							
Total						55	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Soporte y Locomoción. De lo cual en el Capítulo 2 se muestra algunas configuraciones de Locomoción de Robots y se analizan locomociones utilizando un soporte de robot circular se analizan 3 alternativas que son:

- **Alternativa 1: Diferencial 2 Ruedas Motrices:** La configuración diferencial de 2 ruedas motrices y una rueda loca, como se muestra en la Figura 38

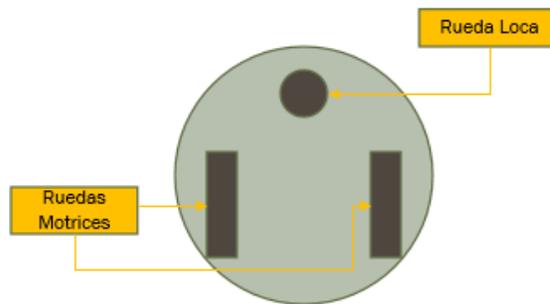


Figura 38 Locomoción Diferencial
2 Ruedas Motrices

- **Alternativa 2: Skid-Steer de 4 ruedas:** La configuración Skid-Steer que es una configuración Diferencial con una variante de varias ruedas motrices. Como se muestra en la Figura 39

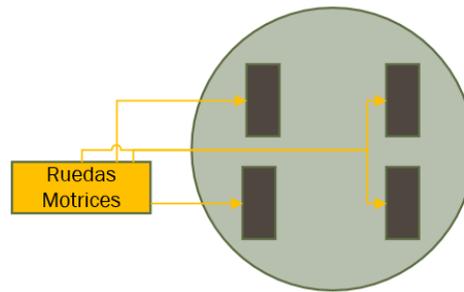


Figura 39 Locomoción Skid-Steer

- **Alternativa 3: Omnidireccional:** La configuración Omnidireccional el cual se analiza es de la forma como se muestra en la Figura 40, sin embargo, en esta configuración se utilizan llantas omnidireccionales las cuales en el mercado son costosas y se consiguen mediante importación.

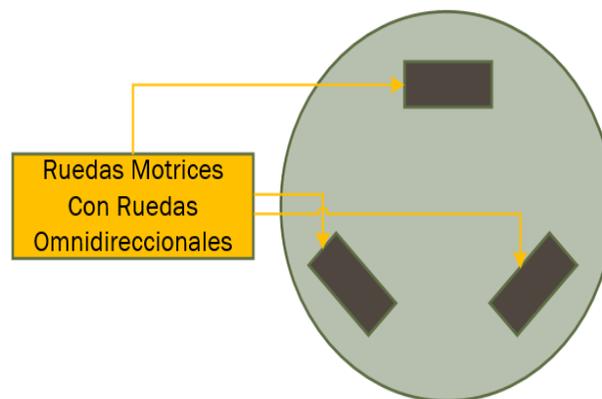


Figura 40 Locomoción Omnidireccional

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 13 hasta la Tabla 17 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 13*Ponderación de las alternativas con el criterio de Peso y Tamaño*

Peso y Tamaño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
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%
Total					

Tabla 14*Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
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%
Total					

Tabla 15*Ponderación de las alternativas con el criterio de Estabilidad*

Estabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	2,5	3,5	19%
Alternativa 2	5		5	11	61%
Alternativa 3	2,5	0		3,5	19%
Sumatoria				18	100%
Total					

Tabla 16*Ponderación de las alternativas con el criterio de Robustez*

Robustez	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		2,5	8,5	47%
Alternativa 3	5	2,5		8,5	47%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 17*Ponderación de las alternativas con el criterio de Movilidad*

Movilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		2,5	5	8,5	47%
Alternativa 2	2,5		5	8,5	47%
Alternativa 3	0	0		1	6%
Sumatoria Total				18	100%

En la Tabla 18 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 18*Selección de concepto de Soporte y Locomoción*

CRITERIO	Peso y Tamaño	Costo	Estabilidad	Robustez	Movilidad	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1	0,073	0,052	0,065	0,004	0,159	0,352	35%
Alternativa 2	0,009	0,052	0,206	0,030	0,159	0,455	45%
Alternativa 3	0,073	0,006	0,065	0,030	0,019	0,193	19%
Sumatoria Total						1	100%

De la Tabla 18 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 2 lo cual corresponde a una locomoción Skid-Steer de 4 ruedas con un soporte Redondo.

3.4.3. Subsistema 3: Tracción

Para la obtención de alternativas de Tracción se consideran los motores con los requerimientos iniciales, donde el robot móvil necesita tener un torque que permita el movimiento del robot a una velocidad optima con un peso aproximado de 8 Kg, que tenga facilidad de control de posición y el circuito de control no sea complicado. Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Tracción se consideran 4 factores importantes para su selección. Los factores son los siguientes:

- Potencia.
- Costo.
- Facilidad de Control de Posición.
- Facilidad de Circuito de potencia y control.

En la Tabla 19 se realiza la ponderación de los 4 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 19

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 3

CRITERIO	Potencia	Costo	Control Po	Circuito P/C	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Potencia		5	0	2,5	8,5	25%
Costo	0		0	2,5	3,5	10%
Control Posición	5	5		5	16	47%
Circuito P/C	2,5	2,5	0		6	18%
Sumatoria Total					34	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Tracción. En el Capítulo 2 se presenta 2 posibles actuadores para la Tracción los cuales se analizan a continuación:

- **Alternativa 1: Motor DC:** Este tipo de motor permite un control de velocidad dependiendo del voltaje de entrada al motor, sin embargo, mientras menor velocidad tenga menor torque tiene el motor. A la vez que para el control de posición se la realiza con la integración de la velocidad y un control moderno (PID, Fuzzy, otros). En la Figura 41 Se muestra un motor DC utilizado para Taladros por lo cual se tiene un torque sumamente alto.



Figura 41 Motor DC

- **Alternativa 2: Motor A Pasos:** Este tipo de motor permite un control de velocidad y de posición dependiendo de pulsos de entrada al motor, con la ventaja de mientras menor velocidad, mayor torque tiene el motor. Sin embargo, se necesita electrónica especializada para el control de este tipo de motor, a la vez que el procesamiento del controlador es mayor dado que el control de giro es por la cantidad de pulsos y su Periodo. En la Figura 42 Se muestra un motor a pasos comercial. Tiene un costo más alto que un motor DC.



Figura 42 Motor a Pasos

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 20 hasta la Tabla 23 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 20

Ponderación de las alternativas con el criterio de Potencia

Potencia	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	1	14%
Alternativa 2	5		6	86%
Sumatoria Total			7	100%

Tabla 21

Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	6	86%
Alternativa 2	0		1	14%
Sumatoria Total			7	100%

Tabla 22*Ponderación de las alternativas con el criterio de Control Posición*

Control Posición	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	1	14%
Alternativa 2	5		6	86%
Sumatoria Total			7	100%

Tabla 23*Ponderación de las alternativas con el criterio de Circuito P/C*

Circuito P/C	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	6	86%
Alternativa 2	0		1	14%
Sumatoria Total			7	100%

En la Tabla 24 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 24*Selección de concepto de Tracción*

CRITERIO	Potencia	Costo	Control posición	Circuito P/C	ξ Total	PONDERACIÓN
Alternativa 1	0,036	0,088	0,067	0,151	0,34243697	34%
Alternativa 2	0,214	0,015	0,403	0,025	0,65756303	66%
Sumatoria						
					1	100%
Total						

De la Tabla 24 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 2 lo cual corresponde a una Sistema de Tracción con Motor a Pasos.

3.4.4. Subsistema 4: Medición de Entorno

Para la obtención de alternativas de Medición de Entorno se consideran los requerimientos iniciales, donde el robot móvil necesita tener un buen funcionamiento en SLAM y Recuperación de la Ubicación, y para ello necesita un buen sensado para medición del entorno. Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Medición de Entorno se consideran 5 factores importantes para su selección al momento de medir distancia con obstáculos. Los factores son los siguientes:

- Facilidad de comunicación con Controlador
- Precisión y exactitud al Medir distancias con obstáculos
- Costo
- Posea Repositorios y Drivers para comunicación con controlador (Soporte)
- Cantidad de Datos

En la Tabla 25 se realiza la ponderación de los 5 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 25

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 4

CRITERIO	Comunicación	Precisión y Exactitud	Costo	Soporte	Datos	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Comunicación		0	2,5	2,5	0	6	11%
Precisión y Exactitud	5		5	5	2,5	18,5	34%
Costo	2,5	0		0	0	3,5	6%
Soporte	2,5	0	5		2,5	11	20%
Datos	5	2,5	5	2,5		16	29%
Sumatoria Total						55	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Medición de Entorno. En el Capítulo 2.3.1 se muestra 3 tipos de sensores usados en la robótica con la finalidad de tomar medidas de distancia en el entorno, y esas alternativas son:

- **Alternativa 1: Sonar:** El sonar es una distribución de sensores ultrasónicos, que permiten medir el contorno del robot, y es de bajo costo, sin embargo, su precisión y exactitud es baja, además que consume procesamiento del controlador dado que en un procesamiento paralelo necesita la toma de datos, enviando el pulso de Trig y recibiendo el Echo. En la Figura 43 se muestra un ejemplo de la distribución de ultrasónicos.



Figura 43 Anillo de Sonares

- **Alternativa 2: Kinect:** El uso de sensor Kinect para medición de distancia no es óptimo, dado que la Kinect al ser una cámara con múltiples sensores que permiten tener una gama de puntos de distancia, no tiene una precisión alta para la medición de distancias, pero su uso es variado. En la Figura 44 se muestra un ejemplo de Kinect.



Figura 44 Kinect

- **Alternativa 3: Lidar:** El uso de lidar permite medir distancias al igual que un ultrasónico, pero con una velocidad mucho más rápida (velocidad de la luz). Existe comercialmente Lidar para robótica que permiten realizar la medición del entorno a 360° como es el caso del Rplidar A1M8, el cual se presenta en la Figura 45, se consigue mediante importación, y su costo es mayor a las otras dos alternativas.



Figura 45 Rplidar A1M8

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 26 hasta la Tabla 30 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 26*Ponderación de las alternativas con el criterio de Comunicación*

Comunicación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		2,5	0	3,5	19%
Alternativa 2	2,5		0	3,5	19%
Alternativa 3	5	5		11	61%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 27*Ponderación de las alternativas con el criterio de Precisión y Exactitud*

Precisión y Exactitud	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		0	6	33%
Alternativa 3	5	5		11	61%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 28*Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	5	11	61%
Alternativa 2	0		5	6	33%
Alternativa 3	0	0		1	6%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 29*Ponderación de las alternativas con el criterio de Soporte*

Soporte	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		2,5	8,5	47%
Alternativa 3	5	2,5		8,5	47%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 30*Ponderación de las alternativas con el criterio de Datos*

Datos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		2,5	8,5	47%
Alternativa 3	5	2,5		8,5	47%
Sumatoria Total				18	100%

En la Tabla 31 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 31*Selección de concepto de Medición de Entorno*

CRITERIO	Precisión y				$\Sigma +1$	PONDERACIÓN	
	Comunicación	Exactitud	Costo	Soporte Datos			
Alternativa 1	0,021	0,019	0,039	0,011	0,016	0,106	11%
Alternativa 2	0,021	0,112	0,021	0,094	0,137	0,386	39%
Alternativa 3	0,067	0,206	0,004	0,094	0,137	0,508	51%
Sumatoria Total					1	100%	

De la Tabla 31 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 3 lo cual corresponde a utilizar un sensor Lidar.

3.4.5. Subsistema 5: Software y Controlador

Para la obtención de alternativas de Software y Controlador, se consideran los requerimientos iniciales, donde el robot móvil necesita tener un software Libre, y un controlador que permita la programación de puertos de salida y entrada, para tomar datos y entregar señales de control utilizando el software ganador.

Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Software y Controlador se consideran combinaciones encontradas entre Software y Controlador, tomando en cuenta que ambos deben tener Comunicación Wireless y Soporte Técnico con Documentación, se genera entonces 5 factores importantes para su selección. Los factores son los siguientes:

- Costo del controlador
- Facilidad de Uso
- Posea Repositorios para programación de Robótica (Soporte)
- Exista información de Utilización (Documentación).
- Procesamiento

En la Tabla 32 se realiza la ponderación de los 5 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 32*Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 5*

CRITERIO	Costo	Uso	Soporte	Documentación	Procesamiento	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Costo		0	0	0	2,5	3,5	6%
Uso	5		2,5	0	5	13,5	25%
Soporte	5	2,5		2,5	5	16	29%
Documentación	5	5	2,5		2,5	16	29%
Procesamiento	2,5	0	0	2,5		6	11%
Sumatoria						55	100%
Total							

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Software y Controlador, el cual consiste en combinaciones posibles de Software encontrados con Controladores, se muestra 4 alternativas para este subsistema:

- **Alternativa 1: Raspberry Pi 2 Model B con Ubuntu Mate Y Ros Kinetic:** La utilización de Raspberry Pi 2 Model B, con un dispositivo de Wifi mediante USB, se puede obtener un controlador para un robot autónomo controlado por Wireless, aparte que Ubuntu Mate tiene repositorios para todos estos adaptadores, Además la utilización de Ros permite utilizar programas de Robótica que facilitarán la programación. El conjunto se muestra en la Figura



Figura 46 Raspberry Pi 2 Model B con Ubuntu Mate y Ros Kinetic

- **Alternativa 2: Raspberry Pi 2 Model B con Raspbian Y Ros Kinetic:** La utilización de Raspberry Pi 2 Model B, con un dispositivo de Wifi mediante USB, y utilizando un sistema operativo de Raspberry llamado Raspbian Jessie, sin embargo, la instalación de ROS Kinetic se dificulta. El conjunto se muestra en la Figura 47

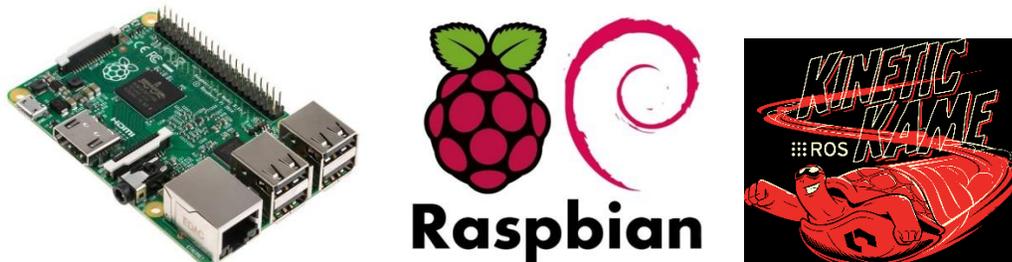


Figura 47 Raspberry Pi 2 Model B con Raspbian y Ros Kinetic

- **Alternativa 3: Odroid XU4 con Ubuntu Mate Y Ros Kinetic:** Un nuevo controlador del mercado, con un costo menor a Raspberry, sin embargo, con poco tiempo de uso, por lo cual existe aún poca información sobre Odroid-XU4 como se muestra en la Figura 48.



Figura 48 Odroid XU4

- **Alternativa 4: Arduino y NUC con Ubuntu Mate Y Ros Kinetic:** La NUC es una computadora pequeña que puede tener cualquier sistema operativo en él, sin embargo, funciona con corriente AC, por lo cual requiere realizar un cambio en la fuente de poder para utilizar electrónica de potencia, y con la utilización de Arduino permite su funcionamiento en envío de datos para motores. El conjunto se muestra en la Figura 49



Figura 49 NUC con Ubuntu Mate y Ros Kinetic

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 33 hasta la Tabla 37 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 33*Ponderación de las alternativas con el criterio de Costo*

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Σ +1	PONDERACIÓN
Alternativa 1		2,5	0	5	8,5	25%
Alternativa 2	2,5		0	5	8,5	25%
Alternativa 3	5	5		5	16	47%
Alternativa 4	0	0	0		1	3%
Sumatoria Total					34	100%

Tabla 34*Ponderación de las alternativas con el criterio de Uso*

Uso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Σ +1	PONDERACIÓN
Alternativa 1		2,5	5	5	13,5	40%
Alternativa 2	2,5		5	0	8,5	25%
Alternativa 3	0	0		0	1	3%
Alternativa 4	0	5	5		11	32%
Sumatoria Total					34	100%

Tabla 35*Ponderación de las alternativas con el criterio de Soporte*

Soporte	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	5	2,5	13,5	40%
Alternativa 2	0		5	0	6	18%
Alternativa 3	0	0		0	1	3%
Alternativa 4	2,5	5	5		13,5	40%
Sumatoria Total					34	100%

Tabla 36*Ponderación de las alternativas con el criterio de Documentación*

Documentación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	5	2,5	13,5	40%
Alternativa 2	0		5	0	6	18%
Alternativa 3	0	0		0	1	3%
Alternativa 4	2,5	5	5		13,5	40%
Sumatoria					34	100%
Total						

Tabla 37*Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento*

Procesamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		2,5	5	0	8,5	25%
Alternativa 2	2,5		2,5	0	6	18%
Alternativa 3	0	2,5		0	3,5	10%
Alternativa 4	5	5	5		16	47%
Sumatoria						
					34	100%
Total						

En la Tabla 38 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 38*Selección de concepto de Software y Controlador*

CRITERIO	Costo	Uso	Soporte	Documentación	Procesamiento	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1	0,016	0,097	0,116	0,116	0,027	0,372	37%
Alternativa 2	0,016	0,061	0,051	0,051	0,019	0,199	20%
Alternativa 3	0,030	0,007	0,009	0,009	0,011	0,066	7%
Alternativa 4	0,002	0,079	0,116	0,116	0,051	0,364	36%
Sumatoria Total						1	100%

De la Tabla 32 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 1 lo cual corresponde a utilizar una Raspberry Pi 2 Model B con Ubuntu Mate y Ros Kinetic.

3.4.6. Subsistema 6: SLAM

Para la obtención de alternativas de SLAM se buscan requerimientos iniciales, donde el robot móvil necesita realizar el SLAM con un bajo procesamiento, con una odometría que puede ser de localización local utilizando sensores o los pulsos de los actuadores.

Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de SLAM se consideran la carga de procesamiento del robot para realizar el SLAM y puede utilizar sensores para la odometría o utilizar el mismo sensor de medición del entorno para la odometría. Por lo cual se consideran 3 factores para el análisis y son:

- Procesamiento
- Facilidad de Implementación
- Cantidad de Requerimientos.

En la Tabla 39 se realiza la ponderación de los 3 factores principales dentro del subsistema.

Tabla 39

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 6

CRITERIO	Procesamiento	Facilidad	Requerimientos	$\xi + 1$	PONDERACIÓN	
Procesamiento		5	2,5	8,5	47%	
Facilidad	0		2,5	3,5	19%	
Requerimientos	2,5	2,5		6	33%	
Sumatoria Total					18	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema SLAM, el cual se muestra 2 alternativas para este subsistema:

- **Alternativa 1: Héctor SLAM:** La utilización de Héctor Slam, consiste en un algoritmo de Localización y Mapeo Simultaneo que utiliza el mismo sensor de medición del entorno para ubicar al robot (odometría) y a la vez realizar el mapa con una forma de Malla.
- **Alternativa 2: Gmapping:** La utilización de Gmapping consiste en utilizar odometría del robot para la ubicación del mismo en el plano mapa, que será generado utilizando un sensor de medición del entorno.

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 40 hasta la Tabla 42 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 40

Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento

Procesamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN	
Alternativa 1		0	1	14%	
Alternativa 2	5		6	86%	
Sumatoria Total			7	100%	

Tabla 41

Ponderación de las alternativas con el criterio de Facilidad

Facilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN	
Alternativa 1		5	6	86%	
Alternativa 2	0		1	14%	
Sumatoria Total			7	100%	

Tabla 42*Ponderación de las alternativas con el criterio de Requerimientos*

Requerimientos	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	6	86%
Alternativa 2	0		1	14%
Sumatoria Total			7	100%

En la Tabla 43 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 43*Selección de concepto de SLAM*

CRITERIO	Procesamiento	Facilidad	Requerimientos	ξ Total	PONDERACIÓN
Alternativa 1	7%	17%	29%	0,51984127	52%
Alternativa 2	40%	3%	5%	0,48015873	48%
Sumatoria Total				1	100%

De la Tabla 43 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 1 lo cual corresponde a utilizar una Héctor Slam.

3.4.7. Subsistema 7: Recuperación de la ubicación

Para la obtención de alternativas de Recuperación de la Ubicación se analizan requerimientos como procesamiento, Facilidad de implementación, Tiempo de respuesta y Exactitud/Precisión. Para la plataforma robótica móvil en el subsistema de Recuperación de la Ubicación se consideran los 4 factores mencionados anteriormente:

- Procesamiento
- Facilidad de Implementación

- Tiempo de Resolución o Respuesta
- Exactitud y Precisión.

En la Tabla 44 se realiza la ponderación de los 4 factores dentro del subsistema.

Tabla 44

Ponderación de criterios de evaluación para el subsistema 7

CRITERIO	Procesamiento	Facilidad	Tiempo de Solución	Exactitud y Precisión	$\Sigma +1$	PONDERACIÓN
Procesamiento		5	0	0	6	18%
Facilidad	0		0	0	1	3%
Tiempo de Solución	5	5		0	11	32%
Exactitud y Precisión	5	5	5		16	47%
Sumatoria						
Total					34	100%

Una vez obtenidas las ponderaciones de criterios de evaluación, se analiza las alternativas de solución al subsistema Recuperación de la ubicación, el cual se muestra 3 alternativas para este subsistema:

- **Alternativa 1: MCL:** La utilización del algoritmo de localización de Monte Carlo, el cual utiliza un alto procesamiento que no disminuye en ningún punto, dado que las muestras no disminuyen solo se las remuestran.

- **Alternativa 2: AMCL:** La utilización de algoritmo de adaptación a la localización de Monte Carlo, consiste en agregar muestras aleatorias dependiendo de la confiabilidad de la resolución para buscar la posición.
- **Alternativa 3: MCL-KDL- Sampling:** La utilización del algoritmo con KDL-Sampling permite disminuir el número de muestras dependiendo de la Distribución y probabilidad.

Se realiza la evaluación de las alternativas, comparándolas entre ellas, con respecto a cada factor de evaluación y selección del diseño. Desde la Tabla 45 hasta la Tabla 48 se analiza los criterios de diseño en cada alternativa.

Tabla 45

Ponderación de las alternativas con el criterio de Procesamiento

Procesamiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		0	6	33%
Alternativa 3	5	5		11	61%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 46

Ponderación de las alternativas con el criterio de Facilidad

Facilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		5	5	11	61%
Alternativa 2	0		0	1	6%
Alternativa 3	0	5		6	33%
Sumatoria Total				18	100%

Tabla 47*Ponderación de las alternativas con el criterio de Tiempo de Respuesta*

Tiempo de Solución	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		2,5	8,5	47%
Alternativa 3	5	2,5		8,5	47%
Sumatoria					
Total				18	100%

Tabla 48*Ponderación de las alternativas con el criterio de Exactitud y Precisión*

Precisión y Exactitud	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi + 1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1		0	0	1	6%
Alternativa 2	5		2,5	8,5	47%
Alternativa 3	5	2,5		8,5	47%
Sumatoria					
Total				18	100%

En la Tabla 49 se muestra la ponderación Total donde la mejor alternativa para el concepto es la que posee una mayor ponderación.

Tabla 49*Selección de concepto de Recuperación de la Ubicación*

CRITERIO	Procesamiento	Facilidad	Tiempo de Solución	Exactitud y Precisión	$\xi +1$	PONDERACIÓN
Alternativa 1	0,00980392	0,018	0,018	0,026	0,072	7%
Alternativa 2	0,05882353	0,002	0,153	0,222	0,435	44%
Alternativa 3	0,10784314	0,010	0,153	0,222	0,493	49%
Sumatoria					1	100%
Total						

De la Tabla 49 se puede obtener como alternativa ganadora a la alternativa 3 lo cual corresponde a utilizar MCL con KDL-Sampling.

3.5. Concepto final

Una vez analizados los resultados de la evaluación y selección de alternativas se genera la Tabla 50 donde se presenta los módulos de la plataforma Robótica Móvil y sus soluciones, para proceder con el diseño de cada uno.

3.6. Módulo de Estructura y Movimiento

Para el módulo de estructura y movimiento se realiza el análisis y diseño de la fuente energética, que consiste en conocer la capacidad que debe tener la batería de ácido de 12 voltios, también en soporte y locomoción se realizará el diseño mecánico de la estructura y el acople de los elementos en ella. En la parte de tracción se diseña cajas de reducción que permiten mejorar el torque de los motores a pasos para mover el robot con el peso estimado y por último el diseño software y controlador que consiste en la programación y el uso de electrónica especializada del controlador para el movimiento del robot.

3.6.1. Diseño Mecánico

Para el diseño mecánico del robot en el módulo de Estructura y Movimiento, se analiza esfuerzos de los soportes, potencia de motores, diseño de cajas de reducción.

3.6.1.1. Diseño de Cajas de Reducción

En primera instancia tenemos a la caja de reducción la cual se analiza, paso a paso, todo su diseño, iniciando con el análisis estático para número de dientes de engranajes hasta el diseño completo de la caja de reducción.

Tabla 50

Módulos de la Plataforma Robótica móvil para interiores.

Módulo	Subsistema	Solución
Estructura y Movimiento	Fuente Energética	Se utilizará una Batería de Ácido con voltaje DC 12V
	Soporte y Locomoción	El sistema de locomoción será utilizar un Skid-Steer de 4 ruedas móviles con un soporte circular.
	Tracción	Se utilizará motores a pasos con cajas de reducción para mejorar torque de cada motor, y con electrónica especializada para control de movimiento.
	Software y Controlador	Se utilizará una Raspberry Pi 2 Model B la cual se programará con ROS para utilizar la electrónica especializada.

Medición del Entorno	Fuente Energética	Se utilizará una Batería de Ácido con voltaje DC 12V el cual necesita un convertidor a 5V DC para energizar sensores.
	Software y Controlador	Se utilizará una Raspberry Pi 2 Model B la cual se programará con ROS para tomar datos y poder manejar datos mediante Tópicos en Ros.
	Medición del Entorno	La detección de obstáculos se realizará con Rplidar 360° A1 M8
Funciones del robot	Software y Controlador	Se utilizará una Raspberry Pi 2 Model B la cual se programará con ROS para realizar el procesamiento de los algoritmos, y obtener un HMI que el usuario pueda ver los resultados.
	SLAM	Se realizará el SLAM con Hector Slam el cual permite el uso del RpLidar para la odometría.
	Recuperación de la Ubicación	Se realizará la recuperación de la ubicación con el algoritmo MCL-KDL Sampling.

Potencia Motores y Factor de Reducción i.

Para analizar el dimensionamiento de los motores, se realiza un diseño mediante Potencias.

$$P_{cinetica} = P_{Motor} \quad (3-1)$$

Si son conocidas las siguientes consideraciones:

$$V_{lineal} \geq 0,15 \frac{m}{s}$$

$$Peso_{Total} \geq 8 Kg$$

Si tenemos que el robot debe subir un plano de 5° , a una velocidad constante, tenemos lo siguiente en base a la ecuación (3-1)

$$(3-2)$$

$$P_{cine} = F * V$$

$$(3-3)$$

$$Peso * V_{lineal} + F_{Inclinada} * V_{Lineal} = P_{Motor} * E_{eficiencia}$$

Por lo cual reemplazando los datos en la ecuación (3-3) obtenemos la potencia del motor:

$$P_{Motor} = (9,81 * 8Kg + 9,81 * 8Kg * Sen(5^\circ)) * \frac{0,15m}{s} = 12,8 watt$$

Al ser 4 motores los que permitan el movimiento tenemos entonces:

$$P_{Cada_Motor} = \frac{12,8}{4} watt = 3,2 watt$$

Por lo tanto, se utiliza un motor NEMA17 Stepper Motor.

Características del motor paso a paso

- Ángulo de paso: $1,8^\circ$ (Precisión 95%)
- Temperatura de funcionamiento: $80^\circ C$

- Voltaje de operación: 12V DC
- Corriente máxima: 1,7 A
- Torque máximo: 48 N.cm
- Tamaño NEMA 17
- 200 pasos por revolución
- Diámetro del eje: 5 mm
- Potencia Max= 5,1 watt

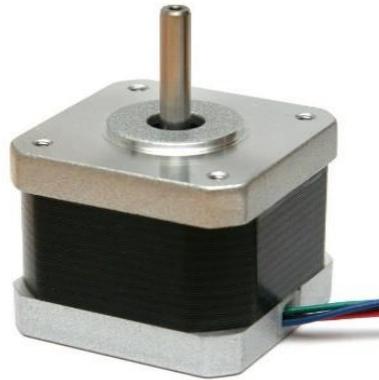


Figura 50 Motor paso a paso NEMA 17

Sin embargo, aunque la potencia del motor sea la adecuada, se tiene que realizar una caja de reducción dado que a velocidades tan altas el torque es bajo, y también afecta el diámetro de las ruedas en el cálculo de velocidad línea, por lo cual se analiza a continuación la reducción necesaria del robot para cumplir con los requerimientos.

Primer se despeja la ecuación (3-3)

$$Peso * V_{lineal} + F_{Inclinada} * V_{Lineal} = T * \omega \quad (3-4)$$

Donde T= Par motor, w= velocidad angular. Como:

$$(3-5)$$

$$\omega = \frac{V_{lineal}}{R}$$

Despejando la Ecuación (3-5) en (3-4) tenemos:

$$Peso * V_{lineal} + F_{Inclinada} * V_{Lineal} = T * \frac{V_{lineal}}{R} * E_{eficiencia\ motor} \quad (3-6)$$

$$\frac{(Peso + F_{Inclinada})R}{E_{eficiencia\ motor}} = T \quad (3-7)$$

Donde R= es el Radio de la rueda del robot. Se puede utilizar ruedas para robótica móvil las cuales son de fácil acceso al mercado y se presentan en la Figura 51.



Figura 51 Ruedas para Robot

Estas Ruedas tiene un Radio de = 0,035 m, es decir 7 cm de Diámetro, y la eficiencia de un motor eléctrico es de 95%. Por lo tanto, tenemos de la ecuación (3-7) despejada.

$$T = \frac{(9,81 * 8Kg + 9,81 * 8Kg * Sen(5^\circ))0,035m}{0,95} = 3,15 Nm$$

Al ser 4 Motores tenemos, por lo tanto:

$$T_{necesario\ por\ motor} = \frac{3,15}{4} Nm = 0,788Nm$$

Analizando la Figura 52, donde se muestra las curvas Torque-Velocidad de un motor a pasos KL17H248-15-4A, el cual será el motor utilizado, se puede observar que el motor a pesar de tener la potencia necesaria para el movimiento, no posee el torque necesario para mover el robot. Por lo cual se realiza una caja de reducción.



Figura 52 Curva Torque-Velocidad de Motor Nema 17

Al conocer que la caja de reducción permite aumentar el torque del motor, pero a la vez la velocidad lineal, disminuye, se busca mediante iteraciones el factor de ganancia mecánica i , de forma que el robot sea capaz de cargar su peso más 1 kg, pero tenga la velocidad más alta posible, lo cual se tiene como resultados lo siguiente:

Si $\omega = 120\text{rpm}$ entonces $T = 0,35\text{Nm}$ según Figura 52

Al obtener una reducción de $i = 2,25$ entonces:

$$V_{lineal} = \frac{\omega}{i} * \frac{2\pi}{60} * R \quad (3-8)$$

Despejando los valores tomados de la ecuación (3-8) obtenemos entonces.

$$V_{lineal} = \frac{120}{2,25} * \frac{2\pi}{60} * 0,035 = 0,195 \frac{m}{s}$$

Y el Torque del Robot es:

$$T_{total} = T_{motor} * 4 * i \quad (3-9)$$

Despejando los valores de la ecuación (3-9) tenemos:

$$T_{total} = 0,35 * 4 * 2,25 = 3,15 Nm$$

El torque necesario para el movimiento del robot es 3,15Nm, por lo cual cumple el robot con su movimiento. Conociendo entonces los valores de la reducción de la caja de reducción se analiza su geometría para proceder a el diseño de sus componentes.

Geometría de caja de Reducción.

Al ser uno de los requerimientos de diseño que el robot tenga un tamaño pequeño se necesita tener una caja de reducción de poco espacio, y a la vez, se necesita que el robot posea una altura mínima de 20mm entre el suelo y la base del robot, para evitar colisiones al momento de subir 5° de pendiente, por lo cual se analiza, la geometría de la caja de reducción, los engranajes y sus componentes.

Los engranajes deben ser de fácil construcción y de tamaño pequeño, y cumplir con una reducción de 2,25, por lo cual, al analizar un engranaje con módulo 1, se conoce que los engranajes rectos no tienen restricción a partir de 16 dientes, por lo cual obtenemos engranajes de

16mm y 36mm, por lo cual se aplica un cambio al engranaje común según AGMA, y se aumenta su adendum. Al final la relación geométrica de cada engranaje permite realizar un engranaje de menor número de dientes siempre y cuando se modifique su forma de diente cambiando su adendum, para ello se utiliza un método de manufactura de corte laser en acrílico.

Por lo cual, utilizando programas avanzados de diseño de engranajes para evitar la interferencia, se tiene los siguientes datos y resultados:

$$Si: c = \text{Distancia entre centros} = 24 \text{ mm}$$

$$n_p = 8 \quad y \quad n_R = 18 \text{ mm} \quad \text{donde } i = 2,25$$

$$\theta = 20^\circ \quad y \quad \text{Adendum de ambos engranajes} = 0,35 \text{ mm}$$

Tenemos como Resultados:

$$\text{Espacio entre dientes} = 5,8 \text{ mm}$$

$$Dp_p = 14,769 \text{ mm} \quad Dp_R = 33,231 \text{ mm}$$

$$Dext_p = 18,71 \text{ mm} \quad Dext_R = 37,17 \text{ mm}$$

$$m = 1,845$$

Y como resultado tenemos la Figura 53 en la que se presenta los engranajes sin interferencia.

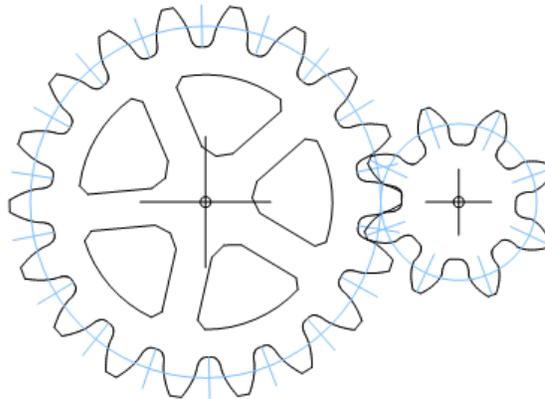


Figura 53 Geometría de engranajes

Como tenemos un modulo de $m=0,1845$; en el mercado no se puede realizar engranajes de este tipo con fresa, por lo cual se utiliza un trabajo de manufactura distinto, como el corte laser en acrilico.

Utilizando este conjunto de engranajes, y colocandolos en posición vertical como se muestra en la Figura 54, se gana altura entre el suelo y la base del robot en 35 mm aproximadamente. Para realizar esta caja de engranajes necesitamos el uso de un eje de 5mm que permita la sujeción del engranaje y de la llanta.

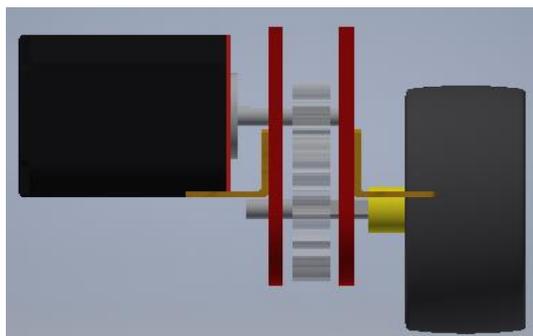


Figura 54 Caja de engranajes vertical

Para utilizar este tipo de composición de los engranajes en la caja de engranajes, es necesario entonces que la caja que se muestra en la Figura 55 tenga las medias de distancia entre centros para su ensamble, y dos puntos para su sujeción a la base del robot.

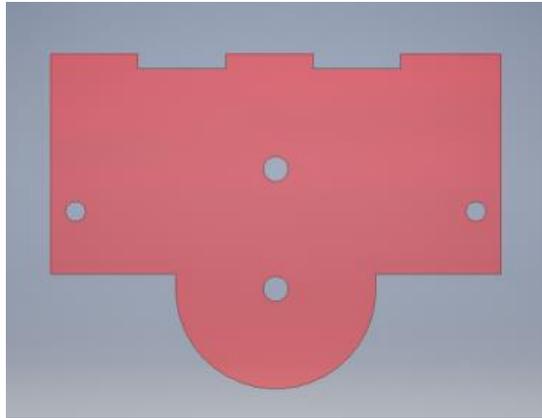


Figura 55 Pared de Caja de Reducción

Diseño de resistencia Mecánica de Caja de Reducción

Para el diseño de resistencia mecánica se inicia analizando los engranajes, los cuales pueden realizarse mediante el método de las ecuaciones de Esfuerzo de AGMA, dado que es una aproximación de este tipo de involuta la que se utiliza en los engranajes. Por lo tanto, se realiza el diseño de esfuerzo mediante las ecuaciones (3-10) y (3-11) tomado de (Budynas & Nisbett, 2012).

$$\sigma_b = \frac{Pd * Ft}{B * J} * K_o * K_v * K_s * K_H * K_B \quad (3-10)$$

$$\sigma_{perm} = \frac{S_I * Y_N}{S_F * K_T * K_R} \quad (3-11)$$

Para analizar esta ecuación se analiza primero los valores importantes del acrílico(PMMA), los cuales son:

$$\sigma_{material} = 7800 \text{ psi} = 53.7 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, se analiza los factores de las ecuaciones (3-10) y (3-11) que tenemos en el piñón, dado que se analiza solo el piñón por ser el más posible en fallar:

$$J = 0,37$$

$$B = 8 \text{ mm}$$

$$Pd = 0,542 \frac{1}{\text{mm}}$$

$$Ft = \frac{2T}{d_p} = \frac{2 * 0,35 \text{ Nm}}{0,01477 \text{ m}} = 47 \text{ N}$$

$$K_o = \text{Factor de Sobrecarga} = 1$$

$$K_v = \text{Factor Dinámico} = 1 \text{ por ser velocidad baja}$$

$$K_s = \text{Factor de Tamaño} = 1,25 \text{ por ser diferente la uniformidad del diente}$$

$$K_H = \text{Factor de Carga} = 1,1 \text{ por piñón}$$

$$K_B = \text{Factor de aro} = 1,3 \text{ por ser la relacion igual a 1.}$$

$$Y_N = 1 = \text{por 1 millon de vueltas}$$

$$K_T = 1$$

$$K_R = 1 \text{ de confiabilidad 99\%}$$

$$S_F = 1,5 \text{ factor de confiabilidad de 1,5}$$

Se realiza un diseño muy Conservador, donde se da confiabilidad del material del 99% y un factor de seguridad de 1,5; y también se analiza todos los puntos del diseño según AGMA, para obtener un diseño optimo, donde podemos observar que utilizando un material de acrílico con un espesor de 8 mm el engranaje puede trabajar sin ningún problema.

$$\sigma_b = \frac{0,542 * 47}{8 * 0,37} * 1 * 1 * 1,25 * 1,1 * 1,3 = 15,39 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{53,7 * 1}{1,5 * 1 * 1} = 35,8 \text{ MPa}$$

Se analiza en la Figura 56 mediante programa CAE de Inventor, la resistencia del Piñón mediante método de Von Mises el cual es semejante a la calculada, En la Figura 57 se obtiene el factor de seguridad del piñón con un factor de seguridad mínimo de 3,56, en la Figura 58 se analiza la deflexión del piñón que la máxima deflexión se da de 0,44 mm. En las tres Figuras se presentan resultados muy buenos de diseño mecánico que cumplen con los requerimientos, esto es dado que las velocidades y las fuerzas de cada llanta no son altas y el diseño previo fue muy conservador.

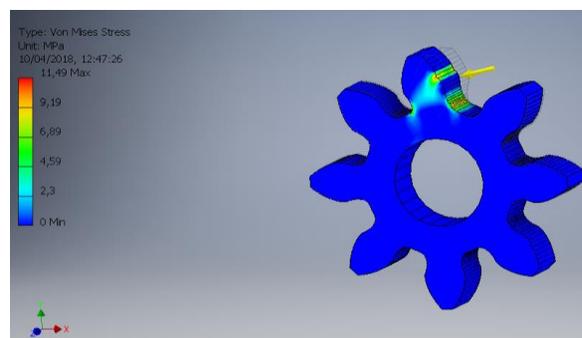


Figura 56 Esfuerzo según Von Mises Stress de una Fuerza en engranaje

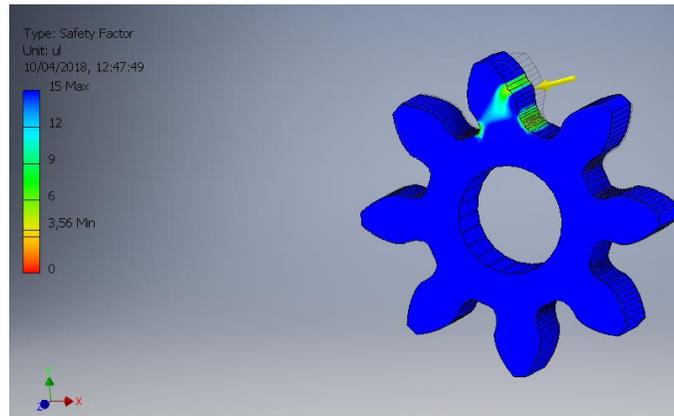


Figura 57 Factor de Seguridad con Diseño CAE

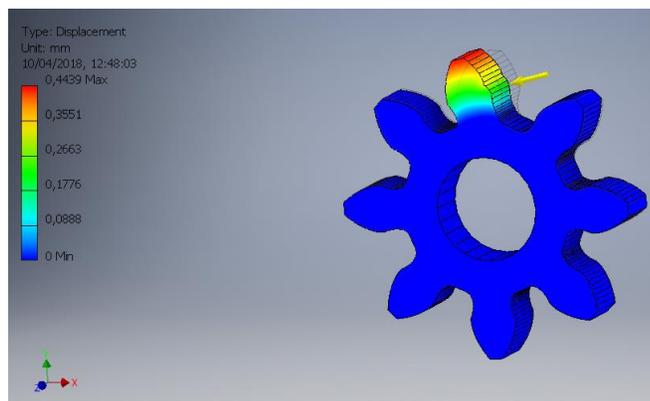


Figura 58 Desplazamiento máximo del engranaje con diseño CAE

Al ser velocidades pequeñas y esfuerzos pequeños, los ejes se realizan de acero A36 con la seguridad de que soporta tanto los ejes, como la caja de reducción se muestra en la Figura 59.

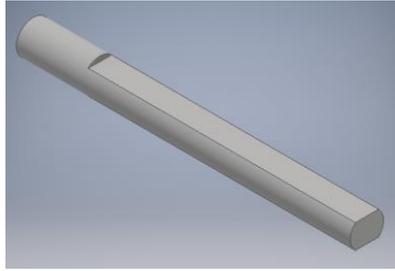


Figura 59 Ejes de Caja de Reducción

El diseño de la caja de reducción se presenta en la Figura 60, donde se presenta los engranajes en vertical, con su respectiva llanta y motor.

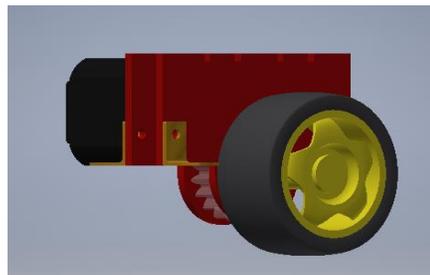


Figura 60 Caja de reducción

3.6.1.2. Diseño de Placa Base del Robot Móvil.

Para el diseño de la Placa base del Robot Móvil, se considera primero la geometría de la placa base y luego se analiza el espesor de la placa base con un análisis estático.

Geometría de Placa Base

Para realizar la geometría de la base del robot, se tiene que distribuir todos los elementos del robot de forma que el peso se establezca en la mitad. En la Figura 61 se muestra la Distribución de

los motores en la base de forma que la distancia entre motores laterales es de 168 mm y la distancia entre motores frontales o traseros es de 195mm.

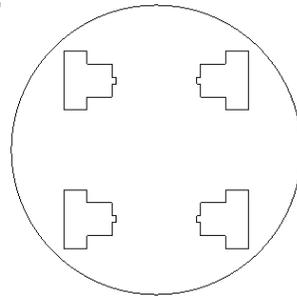


Figura 61 Distribución de Motores

Análisis de Resistencia de Placa Base

Para el diseño de la placa base del Robot Móvil se tiene que tomar en consideración todos los elementos que ejercen presión sobre la placa base. En la Tabla 51 se tiene todos los elementos con sus pesos, y se puede asumir que la distribución del peso es normal hacia el centro.

Para el análisis estático se utiliza programas CAE, y se aplica las cargas estáticas a cada punto según una distribución aproximada. En la Tabla 52 se analiza los Factores de para el análisis CAE

Una vez realizado el análisis, se analizan los resultados. En la Figura 62 el análisis de los esfuerzos principales de Von Mises en la placa tiene como valor máximo a 44,11 MPa que surgen en los concentradores de esfuerzos como las puntas de cada corte. En la Figura 63 se muestra el desplazamiento que tiene la placa, la cual se observa que no supera los 0,06 mm, es un buen diseño para deflexión. En la Figura 64 se analiza el Factor de Seguridad, el cual nos dice que el factor de

seguridad mínimo al usar esta placa es de 4,69, lo que significa que tenemos un gran margen de soporte de la Placa Base del Robot.

Tabla 51
Pesos de Elementos

Elemento	Masa Unitario (g)	Cantidad	Masa Total	Peso Total (N)
Batería	2200	1	2200	21,582
Rapsberry	100	1	100	0,981
Lídar	400	1	400	3,924
Llantas	40	4	160	1,5696
Motores	600	4	2400	23,544
Cuerpo	500	1	500	4,905
Base	550	2	1100	10,791
Cables	150	1	150	1,4715
Conversor	50	1	50	0,4905
Driver	50	2	100	0,981
Caja de Reducción	100	4	400	3,924
		TOTAL	7560	74,1636

Tabla 52
Factores para análisis CAE

Característica	Valor
Material	Acero Galvanizado
Espesor de Placa	1mm
Sy	330MPa
Sut	310MPa

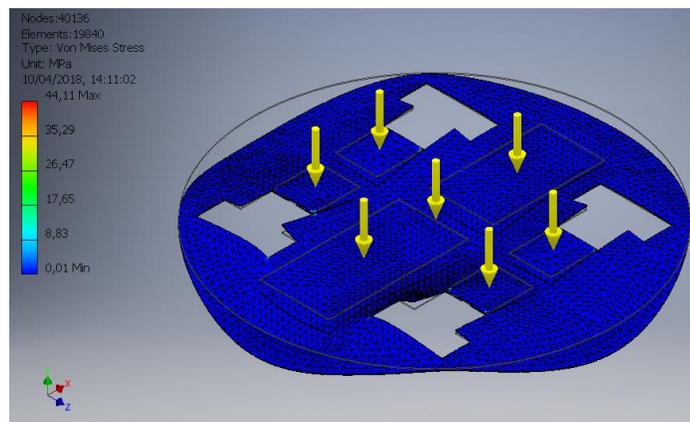


Figura 62 Análisis CAE de Placa Base Von Mises

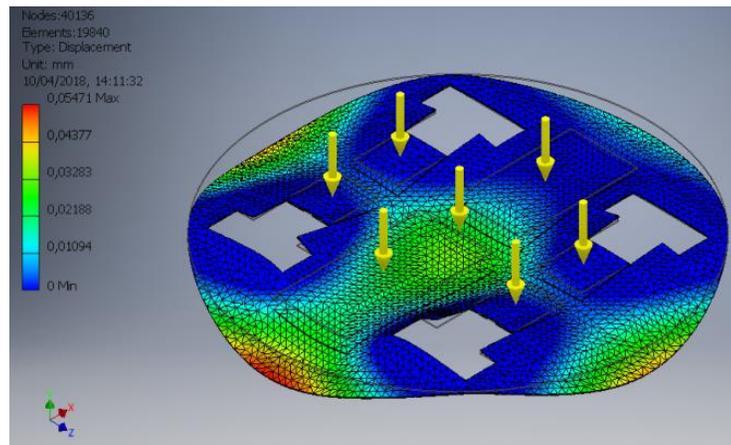


Figura 63 Análisis CAE de Placa Base Desplazamiento

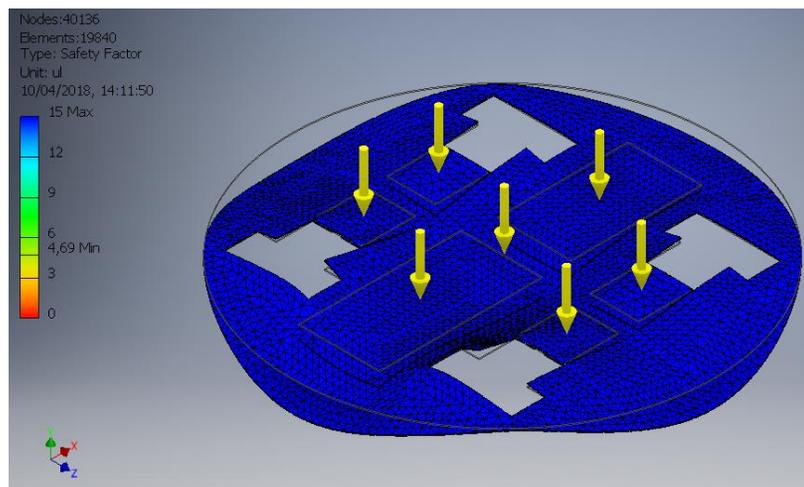


Figura 64 Análisis CAE de Placa Base Factor de Seguridad

Se utilizará una placa de 1mm de espesor para realizar la placa Base del robot.

3.6.1.3. Diseño de Contorno y Estructura

Para realizar el diseño del contorno se toma en cuenta la base, la cual al ser redonda el contorno por ende tendrá forma circular, y una altura de 130 mm para que la batería del robot pueda ingresar

sin ninguna interrupción de otro elemento. Como el contorno no tiene que soportar peso, puede realizarse del mismo espesor y material que la base del robot, lo cual permitirá soldar el contorno a la base del robot.

En la Figura 65 se puede observar el diseño final del contorno de la plataforma Robótica Móvil el cual será acoplado a la placa Base mediante soldadura SMAW en puntos estratégicos, y luego pasado a un proceso de mancillado para tapar huecos y reforzar la estructura.

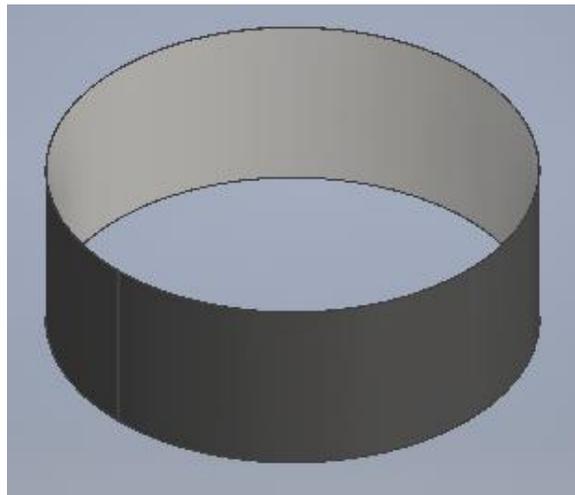


Figura 65 Contorno de Plataforma Robótica Móvil

3.6.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico corresponde al diseño de la Fuente Energética, el control de los motores a Pasos y el diseño de la placa de Control de Actuadores del Robot Móvil.

3.6.2.1. Diseño de Fuente Energética

Para realizar el diseño de la Fuente Energética se requiere conocer la Potencia de los elementos electrónicos, para poder conocer la capacidad de la Batería para soportar 1 Hora de trabajo. En la

Tabla 53 se tiene la Potencia de cada elemento, y por lo tanto el amperaje y el Voltaje de cada elemento.

Tabla 53

Potencia de cada elemento

Elemento	Potencia (watt)	Corriente (A)	Voltaje (V)
Motores	20,4	1,7	12
Raspberry	10	2	5
Lídar	3	0,6	5

Por lo tanto, si tenemos un Voltaje de 12 V, tenemos que analizar las corrientes de pendientes de ese tipo de Voltaje, por lo que se utiliza para ello la ecuación (3-12) como la conservación de energía eléctrica.

$$V_1 * I_1 = V_2 * I_2 \quad (3-12)$$

Reemplazando los valores de Voltajes en esta ecuación tenemos la ecuación (3-13):

$$\frac{5 * I}{12} = I_{12V} \quad (3-13)$$

En la Tabla 54 tenemos las corrientes de cada elemento y su sumatoria final.

Tabla 54
Corrientes de elementos

Elemento	Corriente (A)
Motores	1,70
Raspberry	0,83
Lídar	0,25
TOTAL	2,78

Por lo tanto, tenemos que utilizar una Batería de 2,78 Ah para conseguir una duración de 1 Hora. En el diseño se desea que el robot tenga un funcionamiento de 2 Horas por lo que se puede utilizar una batería de 5,5 Ah lo más cercano y comercial es una Batería de 7 Ah como se muestra en la Figura 66.



Figura 66 Batería de Ácido de 7 Ah

3.6.2.2. Diseño de Drivers Motores a Pasos

Para el control de los motores pasos se utilizará los drivers A4988, con este controlador que se muestra en la Figura 67 se puede obtener el control del motor a pasos mediante pulsos, además que

permite mediante una señal el control de dirección y otra señal el enable, por lo que facilita el control mediante pulsos. En la Tabla 55 se muestra las características Técnicas del Driver utilizado.

Tabla 55

Características Técnicas de Driver A4988

Características	Símbolo	Magnitud
Voltaje de Potencia	VBB	35 [V]
Voltaje de Control	VDD	5[V]
Capacidad de Corriente Máxima	I_OUT	2 [A]
Capacidad de Corriente control	I_DD	0,005 [A]
Temperatura de Funcionamiento	T_A	-20 a 85 [°C]
Motores		2-4 Fases

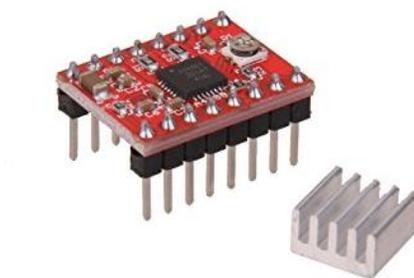


Figura 67 Driver A4988

3.6.2.3. Diseño de Placa de Control de Actuadores

Para el control de los motores a pasos se tiene que realizar una placa de control que contenga los 4 drivers mencionados anteriormente para el control de cada motor a pasos, en la Figura 68 se presenta el esquema de conexión del Driver con el Motor a pasos y en la Figura 69 el esquema de conexión en Proteus 8 con un integrado similar, para la representación del driver A4988 se utiliza dicho integrado.

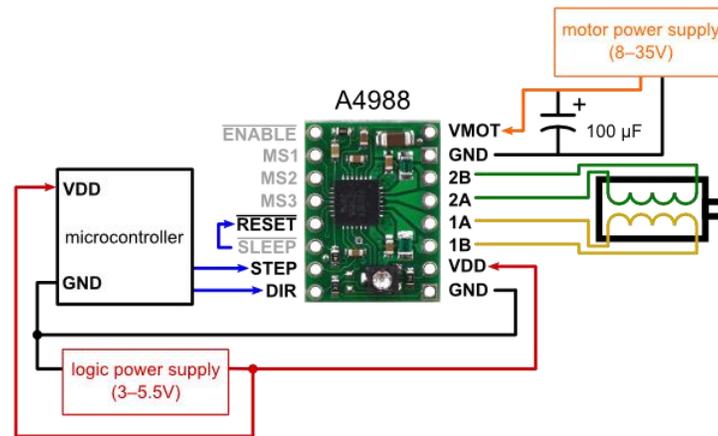


Figura 68 Esquema de Conexión del Motor a Pasos

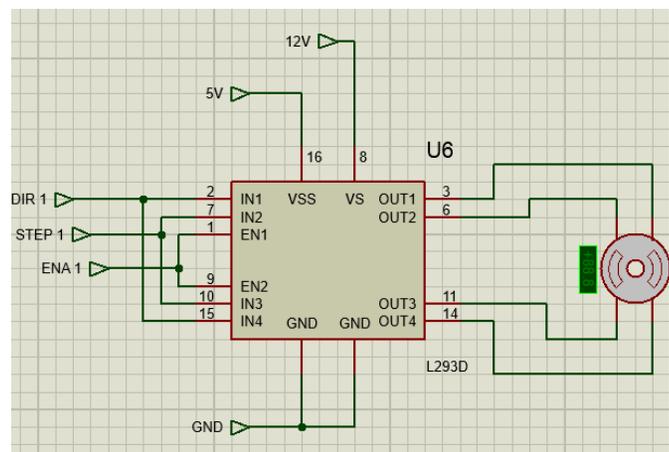


Figura 69 Esquema de Conexión en Proteus 8

En el diseño de la Placa de Control de Actuadores, por lo tanto, se requiere a partir de 12V energizar la Raspberry Pi 2 Model B el cual tiene una energía de entrada de 5V, y se presenta en la Tabla 56 las características del controlador.

Para energizar los elementos de 5 V es necesario el uso de un Conversor de 12V a 5V, sin embargo, la corriente necesaria para ese conversor se puede observar en la Tabla 53, que sería de 2,6 A incluyendo al Lidar en el análisis, por lo tanto, se utiliza el Conversor LM2596 Buck que se muestra en la Figura 70, el cual soporta una corriente máx de 3A.



Figura 70 Conversor 12Vdc-5Vdc
LM2596

Tabla 56
Características Técnicas Raspberry Pi 2 Model B

Raspberry Pi 2 Modelo B	
Procesador Principal	Broadcom 900 Mhz ARMv7 Quad Core
RAM	1 GB
Procesador Gráfico	VideoCore 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

Multimedia	HDMI, audio via 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 lo tanto, tenemos el esquema de conexión final de la parte de control para los motores a pasos con su controlador y sus drivers en la Figura 71.

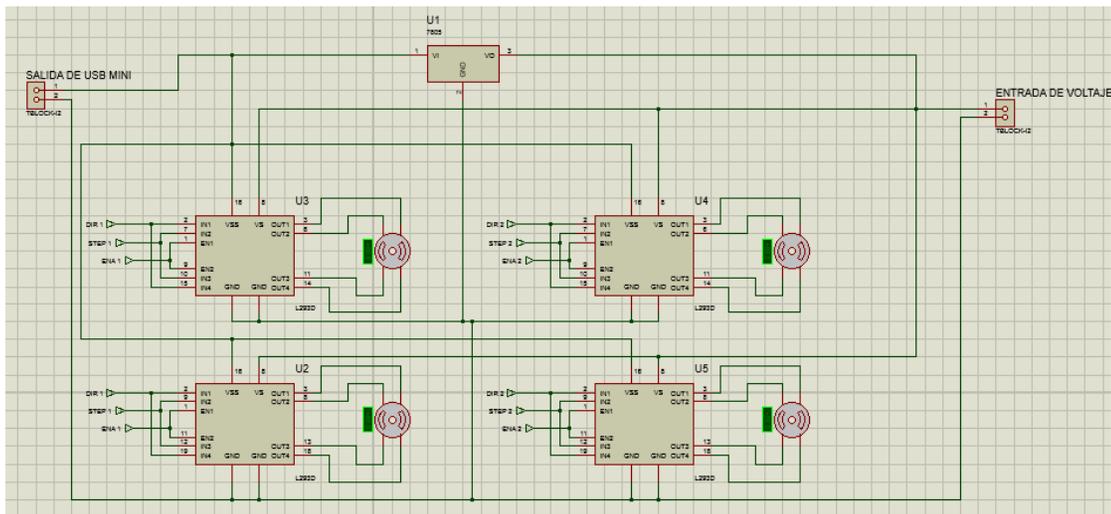


Figura 71 Esquema de Conexión de Motores a Pasos

3.6.3. Diseño del Sistema de Control

3.6.3.1. Control por Pulsos

Para realizar la odometría utilizando los pulsos del motor a pasos es necesario conocer la cantidad de pulsos por vuelta que el robot permite realizar, como dato podemos conocer que

tenemos 1,8° por cada pulso, sin embargo, el driver de A4988 permite realizar 1/16 de ese valor por lo cual analizando tenemos la ecuación (3-14) que convierte el número de pulsos en Distancia Recorrida.

$$\Delta S = \frac{\#_{pulsos} * 2 * \pi * R}{ppv}$$

Donde R es el radio de la llanta = 7 cm= 0,07 m

$$ppv = \frac{200pulsos}{vuelta} * (16)_{factor\ de\ aumento\ por\ driver} = 3200 \quad (3-15)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación (3-15) a la (3-14) tenemos como respuesta.

$$\Delta S = \frac{\#_{pulsos} * 2 * \pi * 0,07m}{3200} = 1,3744x10^{-4} * \#_{pulsos} \quad (3-16)$$

Utilizando la ecuación (3-16) podemos obtener la odometría del robot ulizando los pulsos de cada motor a pasos, y con eso tenemos una localización local.

3.6.4. Diseño Final

El diseño Finalizado del Módulo de Estructura y Movimiento se concentra en la manufactura del soporte del robot, y el sistema de movimiento. En la Figura 72 se muestra el diseño Final del Módulo desde una vista isométrica y con todos los elementos mecánicos y electrónicos analizados, y en la Figura 73 se muestra el Diseño del Módulo en vista Superior, donde se muestra la distribución de los elementos.

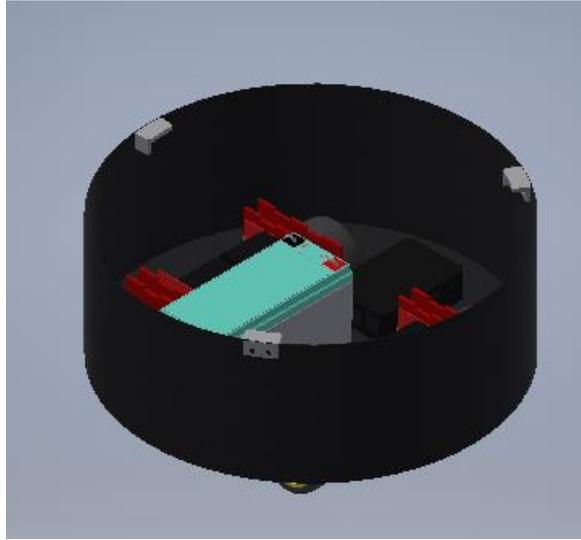


Figura 72 Diseño Final del Módulo de Estructura y Movimiento Vista Isométrica

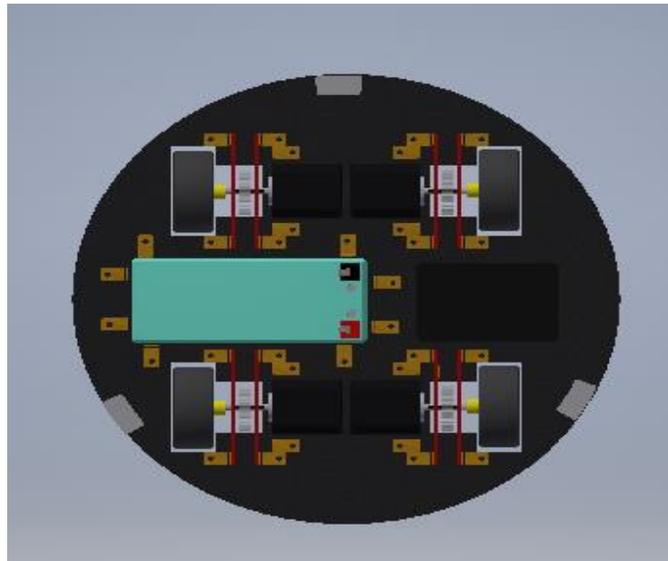


Figura 73 Diseño Final del Módulo de Estructura y Movimiento Vista Superior

3.7. Módulo de Medición del Entorno

Para el módulo de Medición del Entorno se realiza el análisis y diseño de la fuente energética para sensores, que consiste en conectar el sensor de forma que permita la obtención de la corriente necesaria para el trabajo a realiza, también el soporte de la tapa para el sensor mencionado. El control de Tópicos y Drivers para dicho sensor.

3.7.1. Diseño Mecánico

Se considera el diseño de la Tapa del robot para soportar carga en el análisis mecánico del módulo.

3.7.1.1. Tapa como Soporte de Lidar.

Para el diseño de la Tapa del Robot Móvil donde se encuentra el sensor Rplidar 360° A1 M8, se considera primero la geometría de la misma y luego se analiza el espesor de la placa con un análisis estático.

Geometría de Tapa

La tapa tiene que tener ciertos agujeros principales para poder colocar soportes, switch y al sensor Lidar en el centro del robot, por lo cual se muestra en la Figura 74 la geometría de la Tapa del Robot Móvil.

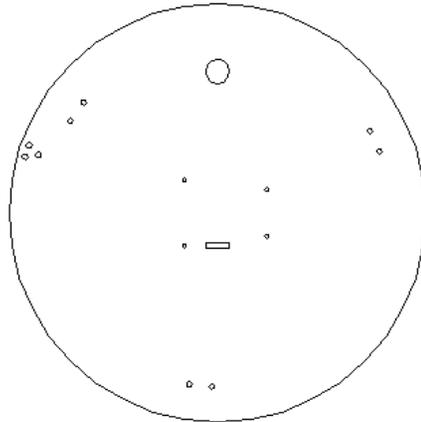


Figura 74 Geometría de Tapa del Robot Móvil.

En los puntos centrales es donde se conectará el Lidar se ajustará para su uso.

Análisis de Resistencia de Tapa

Para el diseño de la Tapa del Robot Móvil se tiene que tomar en consideración el peso del Lidar que ejerce presión sobre la placa. En la Tabla 51 se tiene que el peso del Lidar es $P=3,924N$.

Para el análisis estático se utiliza programas CAE, y se aplica las cargas estáticas a cada punto según una distribución aproximada. En la Tabla 57 se analiza los Factores de para el análisis CAE de la Tapa.

Tabla 57
Factores para análisis CAE de Tapa

Característica	Valor
Material	Acrílico
Espesor de Placa	3mm
Sy	48MPa
Sut	79,8MPa

En la Figura 75 se analiza los esfuerzos principales de Von Mises en la Tapa donde el valor máximo es de 1,64 MPa. En la Figura 76 se analiza la deformación de la Tapa del robot ya que esa característica puede fallar por el material (Acrílico), y se tiene que la deformación máxima es de 0,16 mm por lo tanto soporta perfectamente la tapa.

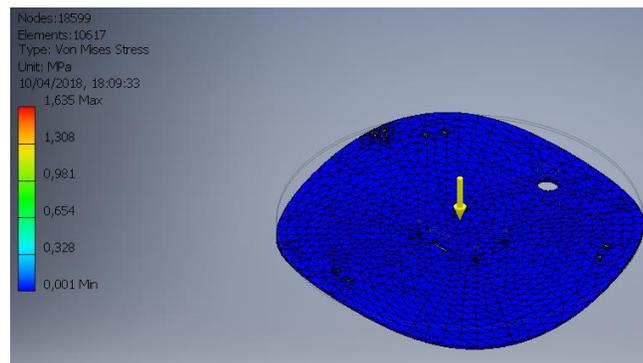


Figura 75 Análisis CAE de Tapa Von Mises

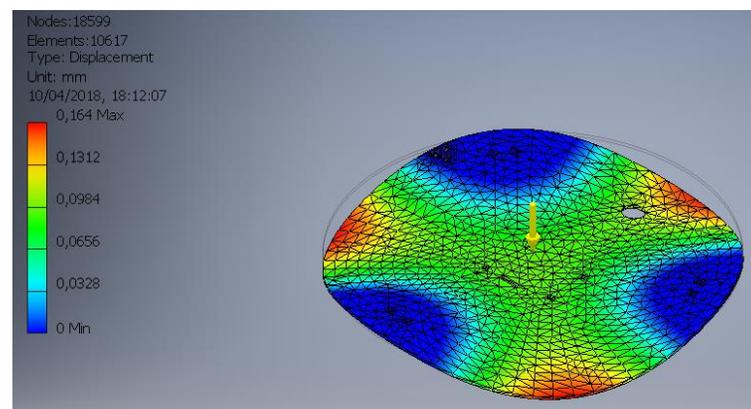


Figura 76 Análisis CAE de Tapa Desplazamiento

Se utilizará una placa de 3mm de espesor de Acrílico para la placa Tapa del Robot, en la Figura 77 se muestra la unión del Rplidar A1 M8 con la Tapa.

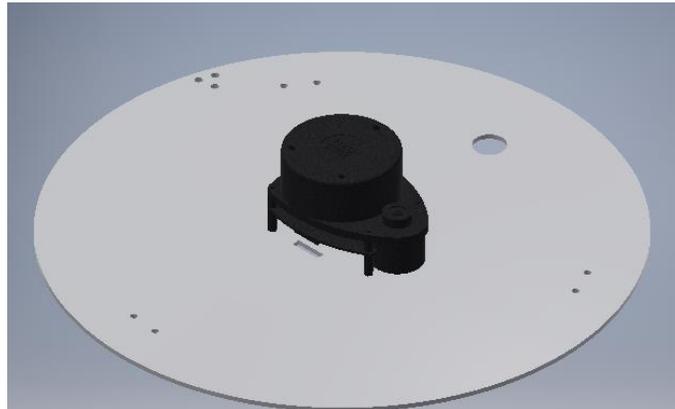


Figura 77 Ensamble de Rplidar con Tapa

3.7.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico que corresponde al módulo de medición del entorno consiste en el diseño de fuente energética para el sensor y en la conexión.

3.7.2.1. Diseño de Fuente energética para Sensor Lidar

Se analiza en primera instancia el sistema del Lidar en la Figura 78, donde se explica que al tener un Sistema de Motor requiere de una corriente máxima al momento de adquirir datos. En la Tabla 58 se presenta las especificaciones técnicas del Rplidar A1M8.

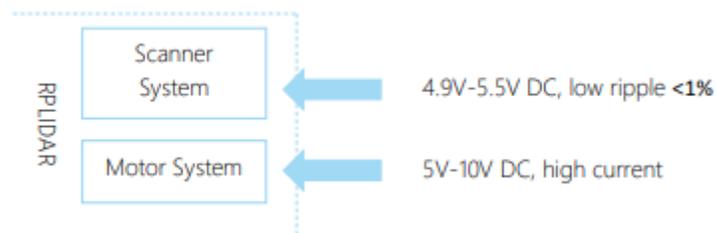


Figura 78 Esquema Rplidar A1 M8

Fuente: (SLAMTEC, 2016)

Tabla 58
Características Técnicas de Rplidar AIM8

Artículo	Unidad	Min	Típico	Max
Voltaje de Sistema de Scanner	[V]	4,9	5	5,5
Corriente de sistema de Scanner de inicio	[mA]	TBD	500	600
Corriente del sistema de Scanner	[mA]	TBD	300	350
Voltaje del Motor	[V]	5	5	10
Corriente del Motor	[mA]	TBD	100	TBD

Fuente: (SLAMTEC, 2016)

Por lo tanto, tenemos que la corriente de inicio del sistema de escaneo es de 600[mA] por lo que la Raspberry Pi 2 model B soporta esa corriente en sus puertos USB siempre y cuando no exista otro consumido de energía que en el caso de la Raspberry es el adaptador de USB Wireless, por lo tanto, se realiza un diseño electrónico para permitir obtener la energía para el Lidar de la fuente principal, y usar el puerto USB para comunicación.

En la Figura 79 se presenta el esquema de conexión del sensor Lidar, donde se observa que la fuente del sensor entra por la misma fuente energética de la Raspberry, permitiendo adquirir la corriente para su arranque de 600 [mA], mientras que se utiliza puertos USB para la conexión de la comunicación.

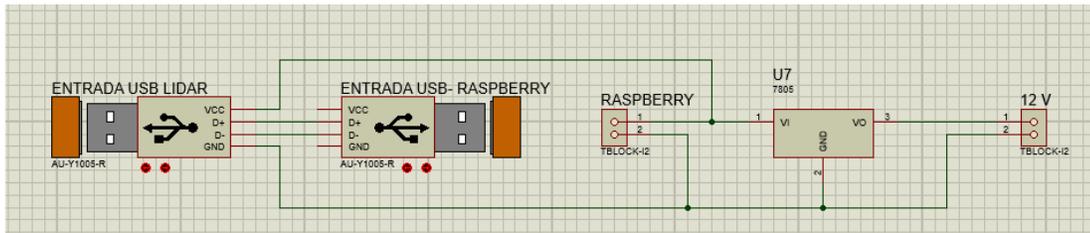


Figura 79 Esquema de Conexión de Lidar por USB

3.7.3. Diseño Final

Una vez finalizado el diseño finalizado del Módulo de medición del Entorno se realiza el ensamble total con el diseño del módulo anterior y obtenemos toda la parte de movimiento y medición de entorno del robot. En la figura 80 se muestra el robot finalizado en todo su ensamble.

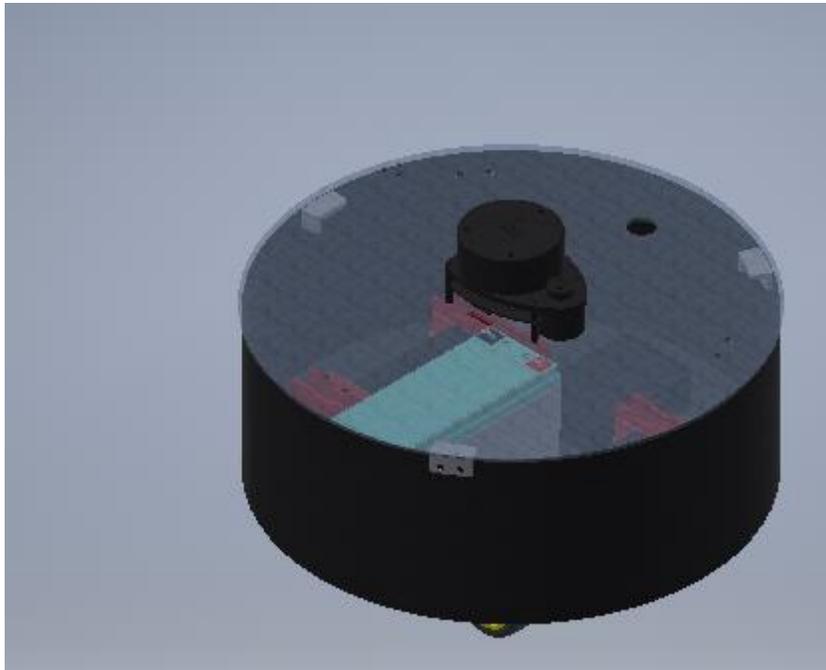


Figura 80. Robot ensamblado con Moduló de medición de Entorno

3.8. Módulo de Funciones del Robot

El módulo de Funciones del Robot consiste en analizar los algoritmos para SLAM y para Recuperación del Robot en caso de Rupto; por lo cual se analiza el diagrama de relación entre los nodos que se utilizarán.

3.8.1. Héctor SLAM

Para realizar SLAM, se utilizará el algoritmo de Héctor Slam, el cual consiste en mapeo y localización simultánea utilizando el sensor de Medición del Entono (Lidar) para buscar su posición en el mapa, por lo cual se utiliza un nodo de robot_state_publisher que permite encontrar la posición del robot mediante el sensor.

Se forma mediante el nodo de teleoperación el movimiento de los motores derecho e izquierdo, y Héctor Slam permitirá obtener desde una transformada de movimiento/posición (tf) y el scanner del sensor (scan) un mapa (map), en la Figura 81 se presenta una relación de Nodos que se plantea realizar para obtener el SLAM.

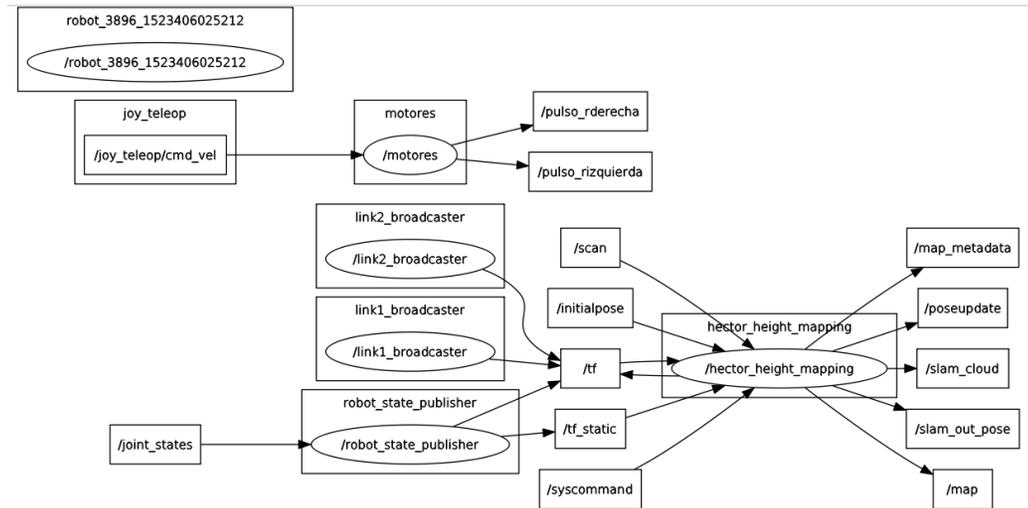


Figura 81 Relación entre Nodos para Obtención de SLAM

3.8.2. MCL con KDL-Sampling

Para realizar la Recuperación de la Ubicación ante el problema del robot Secuestrado, se utilizará el algoritmo de Localización de Monte Carlo con Muestreo KDL. Además, se agrega una teoría de muestreo inicial que consiste en crear 40 muestras por cada metro cuadrado de mapa conocido como se muestra en la ecuación (3-17). A continuación, se presenta el algoritmo a realizar.

$$M_{inicial} = 40 * A \quad (3-17)$$

Donde $A = m^2$ de mapa

Algoritmo KLD – sampling con MCL($X_{t-1}, u_t, z_t, \text{map}$):

- 1: $\bar{X}_t = X_t = \alpha = 0$ (valores iniciales)
 - 2: $n = M_{\text{inicial}}$ (Valor inicial)
 - 3: Desde $m = 1$ hasta n hacer:
 - 4: $x_t^{[m]} = \text{modelo de movimiento de muestra}(u_t, x_{t-1}^{[m]})$
 - 5: $w_t^{[m]} = \text{Modelo de medida}(z_t, x_t^{[m]}, \text{map})$ (medida de importancia de la muestra)
 - 6: $\alpha = \alpha + w_t^{[m]}$ (actualización factor de normalización)
 - 7: $\bar{X}_t = \bar{X}_t + (x_t^{[m]}, w_t^{[m]})$ (Ingreso de muestra)
 - 8: Agregar muestra $j(n)$ en una distribución discreta según el peso de \bar{X}_t
 - 9: Si ($x_t^{[m]}$ esta en una columna vacío b) Entonces: (Se actualiza el número de columnas con soporte
 -)
 - 10: $k = k + 1$
 - 11: $b = \text{no} - \text{vacío}$
 - 12: Terminar Desde
 - 13: KDL sampling: $n = \frac{k-1}{2\epsilon} \left\{ 1 - \frac{2}{9(k-1)} + \sqrt{\frac{2}{9(k-1)} z_{1-\delta}} \right\}^3$
(Actualizar número de muestras)
 - 14: Desde $m = 1$ hasta n Hacer:
 - 15: $w_t^{[i]} = \frac{w_t^{[i]}}{\alpha}$ (normalizar pesos de muestra)
 - 16: Dibujar $i \in \{1, \dots, N\}$ con probabilidad $\propto w_t^{[i]}$
 - 17: Añadir $x_t^{[i]}$ a X_t
 - 18: terminar desde
 - 19: retornar X_t
- Donde: $X_t = \text{Posición Estimada}$; $u_t = \text{Variable de Control}$; $z_t = \text{Medida}$;
 $n = \text{número de muestras}$

Para la recuperación de la ubicación se utiliza un mapa guardado, con `map_server`, se utiliza un nodo de movimiento de motores, y un nodo para transformación de posición en transformada de movimiento (tf), gracias a la odometría, al scanner (scan) aplicamos el algoritmo y debemos obtener la nube de partículas, o nube de muestras donde nos indique la posición aproximada del robot, en la Figura 82 se presenta una relación de Nodos que se plantea realizar para obtener la recuperación de la Ubicación del Robot.

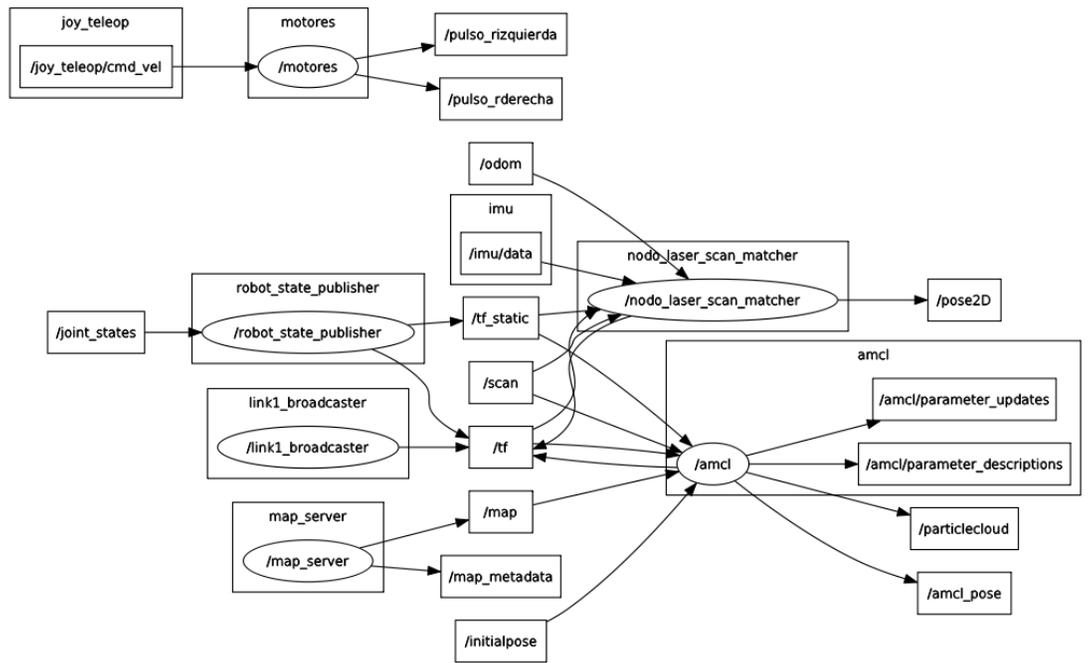


Figura 82 Relación entre Nodos para Obtención de Recuperación de la Ubicación

3.9. Resumen

Para realizar un diseño Mecatrónico óptimo, es importante conocer las necesidades del usuario y los requerimientos técnicos del proyecto para poder obtener mediante la selección de alternativas un concepto claro y óptimo que cumpla con los requerimientos planteados. En la plataforma robótica móvil se presenta en la Tabla 4 las necesidades y requerimientos para este proyecto.

En primer lugar, al producto se lo divide en subsistemas para con cada uno, realizar un análisis de concepto posible. En este proyecto se tiene 7 subsistemas, 1) Fuente energética, 2) Soporte y locomoción, 3) Tracción, 4) Medición de Entorno, 5) Software y Controlador, 6) SLAM, 7) Recuperación de la ubicación.

Al tener los subsistemas establecidos mediante la selección de concepto podemos encontrar un buen diseño que cumplan con los requerimientos iniciales para a continuación dividir al proyecto en módulos y con ellos realizar un diseño de parte mecánica, electrónica y de control en cada módulo. Para este proyecto se dividió en tres módulos 1) Estructura y movimiento, 2) Medición de entorno, 3) Funciones del robot.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se describe la construcción de cada módulo presentado en el Capítulo 3 que conforman la plataforma Robótica Móvil seguido de la presentación de pruebas y resultados del Robot.

4.1. Estructura y movimiento

La estructura del robot que corresponde a la base y el contorno, está realizada con plancha de acero galvanizado de 1,1 mm, el cual se realiza con corte por chorro de agua y doblado para posteriormente realizar el soldado de la estructura, mientras que las cajas de reducción se realizan en primera instancia los ejes de la caja, seguido de los engranajes y las paredes mediante corte laser en acrílico. Se da los acabados de la estructura el ensamble y la conexión de todo el módulo de estructura y movimiento.

4.1.1. Corte en agua de la Base y Doblado del Contorno

Para la construcción de la base de la plataforma robótica de interiores, se la realiza con corte de acero galvanizado como se muestra en la Figura 83. Para realizar la base del robot, se procede a realizar por corte por chorro de agua en CNC ya que al existir cavidades en formas cuadradas se complica el usar herramientas manuales para realizar este tipo de trabajo. Se necesita tener una buena precisión en las cavidades para que el robot no posea interferencia por su movimiento (Skid-Steer) y en su forma redonda para no tener complicaciones en el soldado.



Figura 83 Corte de Acero Galvanizado 1,1mm

Con el corte por chorro de agua además se puede obtener ventajas como el no alterar las propiedades mecánicas del material y que no exista dobladuras de la base para evitar complicaciones en el soldado. Consecuente a esto, se procede a realizar el taladrado de los puntos donde va sujeciones de las cajas de reducción y todos los elementos como se muestra en la Figura 84.a y Figura 84.b. No se realizaba estos huecos en la CNC porque aumentaría su costo de fabricación en gran manera, ya que se cobra por minuto de corte.



a

b

Figura 84 Taladrado de Agujeros de sujeción de elementos

Se realiza el proceso de barolado, qué consiste en doblar el material para realizar el contorno circular del robot con la Roladora como se muestra en la Figura 85.



Figura 85 Barolado de plancha para Contorno del Robot

4.1.2. Soldadura de la estructura

Se realiza el proceso de soldadura del contorno con la base para formar la estructura final de la plataforma robótica para interiores. Se utiliza soldadura SMAW con un electrodo 6011 de 1/8", como se muestra en la Figura 86.a y en la Figura 86.b. Se realiza la soldadura en puntos estratégicos para evitar que la suelda traspase en material dado que es un acero con un espesor pequeño.



a

b

Figura 86 Soldadura de la Estructura del Robot

En la Figura 87 se presenta e resultado de la soldadura de la estructura del robot.



Figura 87 Estructura del Robot Final

4.1.3. Maquinado de ejes de cajas de reducción.

Se realiza el proceso de torneado de los ejes de la caja de reducción. Son 2 ejes que poseen tienen la forma que se presenta en la Figura 88, y se las realiza con un torno para cilindrar y realizar

los puntos para los anillos de sujeción como se muestra en la Figura 89, y con lima gruesa se realiza el aplanado de las caras.

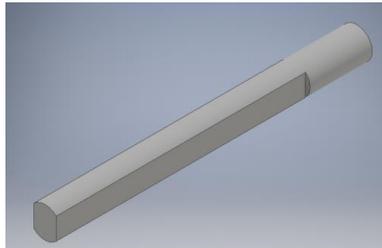


Figura 88 Eje de Caja de Reducción



Figura 89 Torneado de Ejes
a) Cilindrado de eje a 5,5mm b) cilindrado de eje a 5mm c) Limado de eje

4.1.4. Corte láser de engranajes y paredes de cajas de reducción

Se realiza el corte de los engranajes y las paredes de la caja de reducción como se muestra en la Figura 90, mediante el proceso de corte láser en acrílico de 8 mm y 4 mm respectivamente. Se realiza el proceso de corte láser en engranajes porque para evitar la interferencia de los engranajes se adaptó cambiando su forma en el adendum. Por lo cual las fresas tradicionales no funcionan para

este proceso. En la Figura 91 se presenta el plano de corte laser de los engranajes y las paredes de la caja de reducción.



Figura 90 Corte Laser

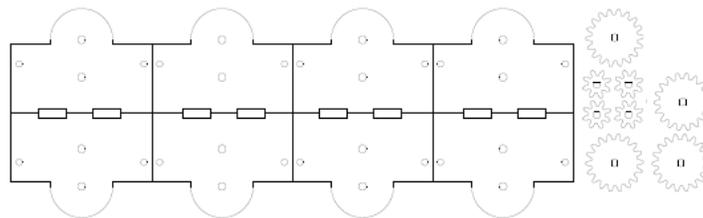


Figura 91 Plano de Corte Laser

En la Figura 92 se presenta los cortes realizados.



a

b

Figura 92 Cortes Laser de Engranajes y Paredes

4.1.5. Pintura de la estructura

En el proceso de pintado primero se masilla las partes de aristas vivas y las partes donde se realizó la suelda de punto para tapar huecos en el proceso de soldado. Se procede a pintar el robot con pintura anticorrosiva de color negro para posteriormente aplicar una capa de laca catalizada mate con la finalidad de proteger el robot del ambiente y mejorar estética. En la Figura 93 se presenta el robot pintado.

4.1.6. Ensamble de cajas de reducción en Base del Robot

Se realiza el ensamble en las cajas de reducción, y los elementos en la base del robot como se muestra en la Figura 93.



Figura 93 Ensamble del Robot

4.1.7. Construcción del Circuito de Control

En la construcción del circuito de control se realiza la placa PCB mediante el diseño realizado en el Capítulo 3, donde contiene un conversor de 12 voltios a 5 voltios y 4 drivers que permitan el manejo de los motores a pasos como se muestra en la Figura 94.

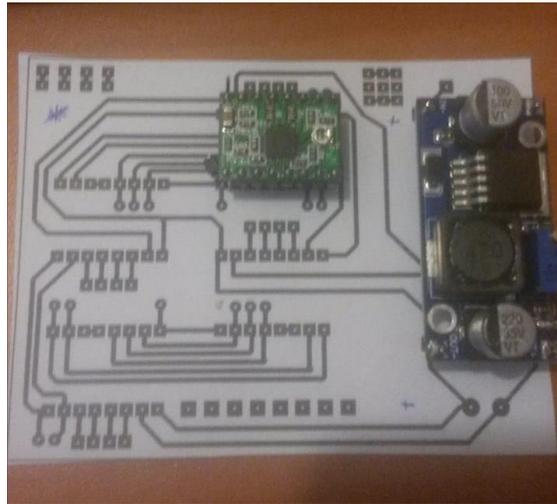
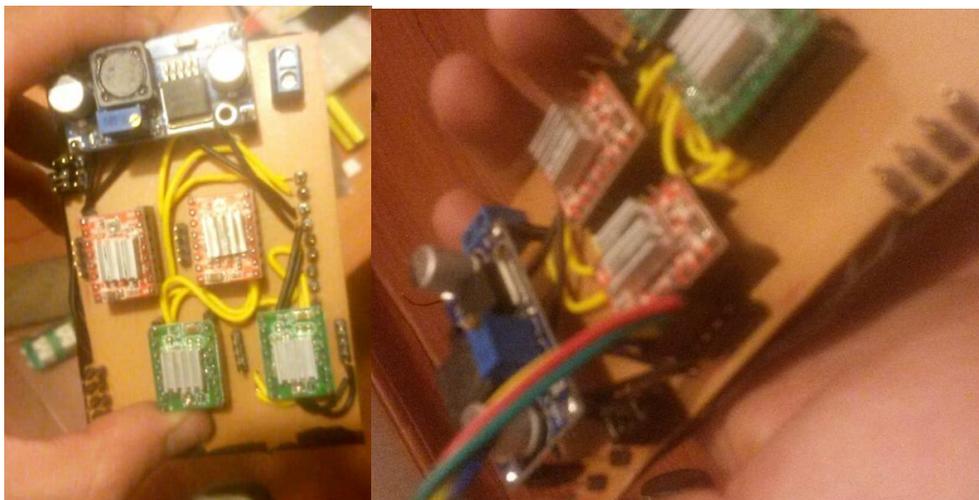


Figura 94 Circuito de Control

Después se realiza la placa, planchando su circuito en la parte de cobre y quemando el cobre con ácido, seguido de soldar los elementos en la placa como se muestra en la Figura 95.a y Figura 95.b.



a

b

Figura 95 Construcción de Placa PCB

Finalmente se construye un piso para colocar en la parte superior del controlador Raspberry Pi 2 Model B, la placa construida previamente como se muestra en la Figura 96.

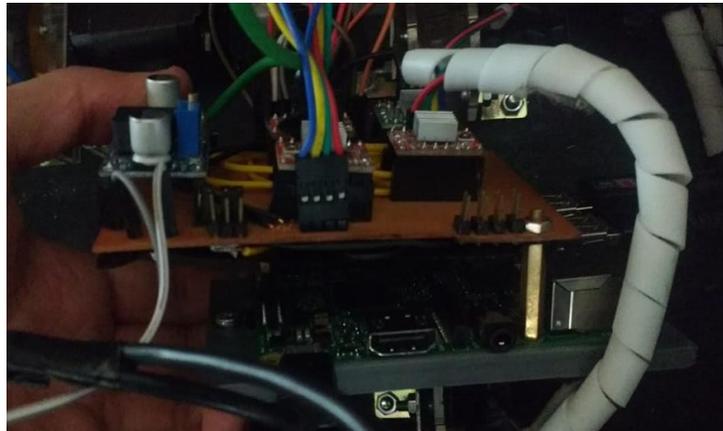


Figura 96 Construcción de Piso

4.2. Medición del Entorno

En la Medición del Entorno corresponde a la tapa del robot y el acople del sensor Lidar para su funcionamiento. Para la tapa del Robot se utiliza acrílico de 3mm de espesor en corte laser, y en el acople de Lidar se realiza el cable USB para conectar comunicación con Raspberry y Fuente con el conversor de 5V.

4.2.1. Corte laser de Tapa

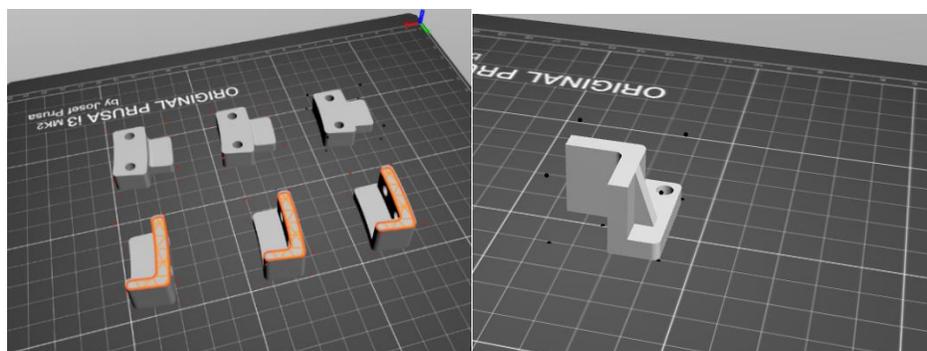
Se realiza el corte láser de la tapa en acrílico de 3 mm como se muestra en la Figura 97 donde se tomó en cuenta los agujeros para el Lidar (sujeción y comunicación), el switch de encendido del robot y los soportes de tapa.



Figura 97 Tapa con Corte Laser

4.2.2. Impresión 3D de soportes de tapa.

Se procede a realizar la impresión 3D de los soportes de la tapa con el contorno del cuerpo del robot. En la Figura 98.a y en la Figura 98.b se presenta el diseño que permitirá a la vez de un soporte de la tapa, evitar que la tapa salga del robot cuando se encuentre en movimiento. En la Figura 99.a se muestra el ensamble en el cuerpo del robot y en la Figura 99.b se muestra el ensamble en la tapa.



a

b

Figura 98 Impresión 3D para soportes



a

b

Figura 99 Ensamble de Soportes en Robot

4.2.3. Construcción de Cable para conexión Lidar

Se realiza la construcción del cable USB en donde los puntos de comunicación se conectan a la Raspberry Pi 2 Model B con su puerto USB, mientras que la Fuente se conecta directamente al convertor de DC-DC de 5 voltios. En la Figura 100.a se presenta el cable conectado a la Raspberry con USB y en la Figura 100.b se presenta el cable que en su otro extremo se conecta con el convertor DC de 5V.



a

b

Figura 100 Cable USB para RpLidar

4.2.4. Ensamble de Sensor con elementos.

Finalmente se ensambla todos los elementos del robot, las cajas de reducción, la batería, el controlador como se observa en la Figura 101.a y se ensambla el Lidar en la Tapa como se observa en la Figura 101.b.



a

b

Figura 101 Ensamble Final

4.3. Funciones del Robot

En las Funciones del Robot corresponde al diseño de la interfaz de SLAM, Recuperación de la ubicación y la creación de los lanzadores para un mejor funcionamiento del robot.

4.3.1. Interfaz SLAM

La interfaz de SLAM tiene tres puntos principales el primero es la parte de visualización dónde se encuentra la localización del robot con respecto al mapa y el mapa en su creación, el segundo se encuentra el control que permite al usuario decidir que desea ver en la primera parte, como por ejemplo el mallado o al robot y la tercera parte permite guardar el mapa, qué se usa cuando el robot haya terminado de mapear el lugar. Se presenta en la Figura 102 la interfaz del Usuario en SLAM.

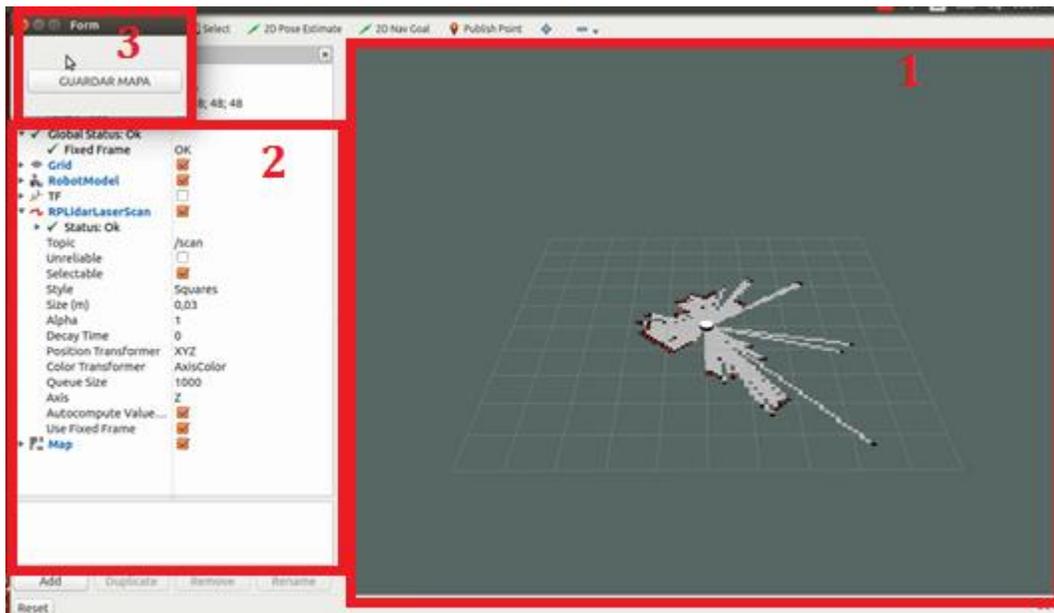


Figura 102 Interfaz del Usuario en SLAM

4.3.2. Interfaz Recuperación de la Ubicación

En la interfaz de recuperación de la ubicación tenemos solamente dos secciones importantes, el primero es la visualización del robot en el mapa conocido, donde los puntos rojos son la nube de puntos en los que son posibles que el robot se encuentre y el segundo es un control que permite al usuario activar o desactivar opciones de visualización. En la Figura 103 se presenta la interfaz de recuperación de la Ubicación.

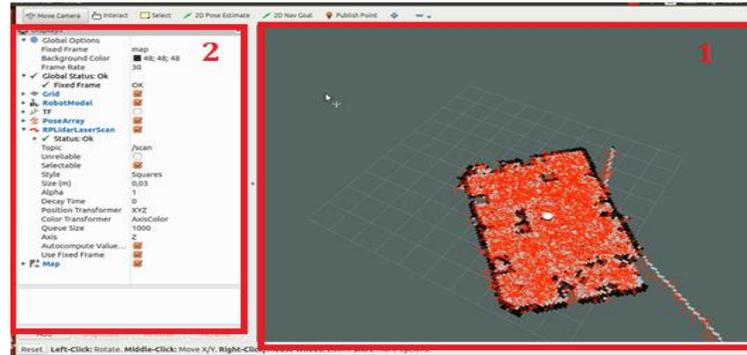


Figura 103 Interfaz de Recuperación de la Ubicación

4.3.3. Creación Lanzadores

Finalmente se realiza la creación de lanzadores para que mediante un clic el usuario pueda poner en marcha y hacer la función que desea realizar. En la Figura 104 se muestra los dos lanzadores que posee el Robot.



Figura 104 Lanzadores Robot

4.4. Pruebas y Resultados

Al finalizar la construcción de la plataforma robótica móvil para interiores se evalúa su funcionamiento del siguiente modo, se realizan 2 pruebas, la primera consiste en realizar el SLAM (Mapeo y Localización Simultanea) y Recuperación de la Ubicación del Robot (Kidnapped Robot Problem) de un Local de 10x12 m de superficie, midiendo resultados de tiempo de convergencia. La segunda Prueba consiste en realizar SLAM y Recuperación de la Ubicación en una oficina del CICTE de aproximadamente 5x8 m y medir resultados de tiempo de convergencia.

4.4.1. Primera Prueba

La primera Prueba consiste en realizar el SLAM (Mapeo y Localización Simultanea) de un local de medida aproximada de 10x12m de superficie, con todos sus obstáculos como sillas, mesas, vitrinas, entre otros, seguido del apagado y encendido del robot en una posición cualesquiera y realizar la Recuperación de la Ubicación del Robot (Kidnapped Robot Problem), midiendo el tiempo de convergencia y el error de estimación de la posición.

4.4.1.1 Resultados SLAM

En la Figura 105 se presenta los resultados de SLAM del Local de medidas 12x10m. Como se puede apreciar el mapa al ser de un plano 2D a la altura del sensor Lidar, se tiene en ciertos puntos, una extensión del mapa, eso es debido a la presencia de una grada en el local, y las extensiones del mapa pequeñas se deben a los vidrios, que, al ser el Lidar un sensor de luz, proyecta una distancia errónea. En la Figura 106 se presenta una foto del Local para poder compararlo con el mapa. Los resultados son buenos, dado que el Robot no perdió su ubicación y el mapa no tiene fallas de superposición.

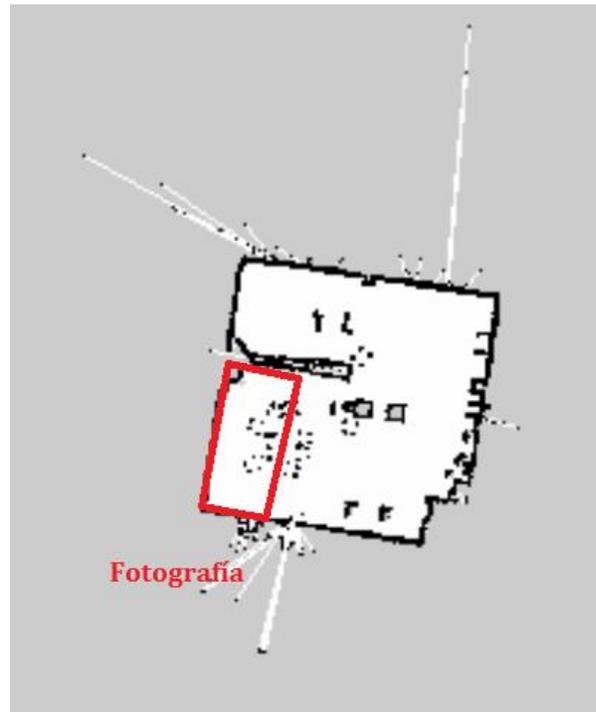


Figura 105 SLAM de Local



Figura 106 Local 12x10 m

Para realizar una medida cuantitativa de los resultados SLAM, podemos comparar medidas principales en el mapa que serán los mostrados en la Figura 107, y se realiza la comparación de las medidas reales y las del mapa en la Tabla 59 donde se muestra el error.

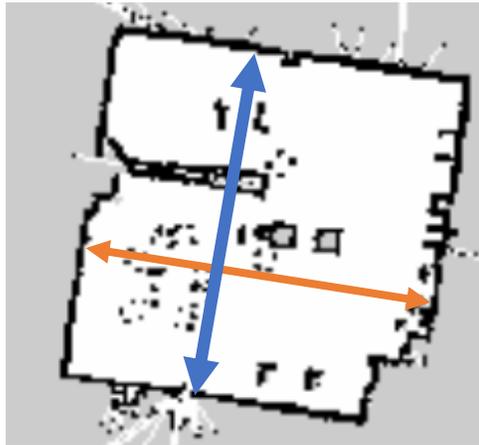


Figura 107 Líneas de Comparación de medidas
(Azul=Linea1), (Tomate=Linea2)

Tabla 59
Error de SLAM

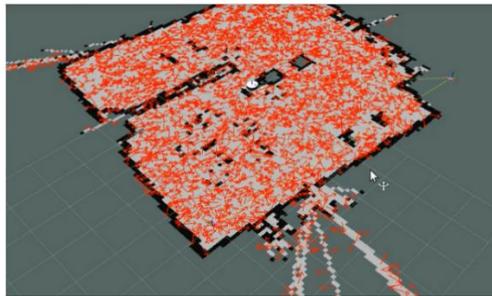
Entorno aproximado- Local			
Lado	Distancia		Error %
	Real (m)	Medido (m)	
L1	12	11,54	3,83%
L2	10	9,78	2,2%

4.4.1.2 Resultados Recuperación de la Ubicación

El robot se mueve a una velocidad de 0,2 m/s, y una velocidad angular de 2 rad/s, esto es importante dado que afecta a la actualización del algoritmo. Se mide el tiempo de solución del robot según pasa el tiempo, y en la posición final se presenta el error de la estimación.

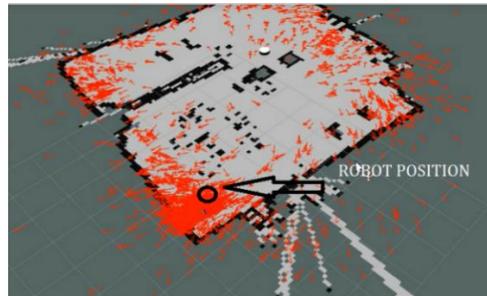
En la Figura 108 Se presenta una secuencia de imágenes para observar el resultado de la ubicación del robot. En la Figura 108.a se tiene el inicio del proceso de ubicación, En la Figura

108.b se muestra como las partículas empiezan a ubicar el robot en un tiempo de 24 segundos, en la Figura 108.c se muestra como las partículas se centraron en dos puntos posibles transcurrido 37 segundos, y finalmente en la Figura 108.d se muestra al robot ubicado en la posición, donde las partículas son mínimas al transcurrir 49 segundos.



a)

a) Prueba de algoritmo en el mapa 12x10 m $\Rightarrow M_{inicial} = 4800$



b)

b) t= 24 s



c)

c) t=37s



d)

d) t=49 s

Figura 108 Resultado de Recuperación de la Ubicación del Robot

El error se presenta en la Tabla 60 que se calcula mediante la ecuación (4-1).

$$e = |z_{real} - x| \quad (4-1)$$

Tabla 60 Tabla de Error de posición

Medida con respecto al	Posición x [m]	Posición Y [m]	Posición angular θ [rad]
origen del mapa			
Real	0,96	4,26	6,17
Estimado	1,01	4,11	6,25
Error	0,05	0,15	0,08
Porcentaje	4,55%	3,52%	1,30%

$$\text{Total error} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = 0,158 \text{ m}$$

Un error de 15 cm en un mapa de 120 metros cuadrados.

4.4.2. Segunda Prueba

La segunda Prueba consiste en realizar el SLAM (Mapeo y Localización Simultanea) de una oficina del CICTE de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, de medida aproximada de 5x8 m de superficie, con todos sus obstáculos como sillas, mesas, vitrinas, entre otros, seguido del apagado y encendido del robot en una posición cualesquiera y realizar la Recuperación de la Ubicación del Robot (Kidnapped Robot Problem), midiendo el tiempo de convergencia.

4.4.2.1 Resultados SLAM

En la Figura 109 se presenta los resultados de SLAM de la Oficina CICTE de medidas 5x8m. Como se puede observar el mapa en un tamaño menor al ser una oficina cerrada por paredes, el mapa 2D tiene un mejor resultado que el anterior dado que no hay presencia de vidrios.

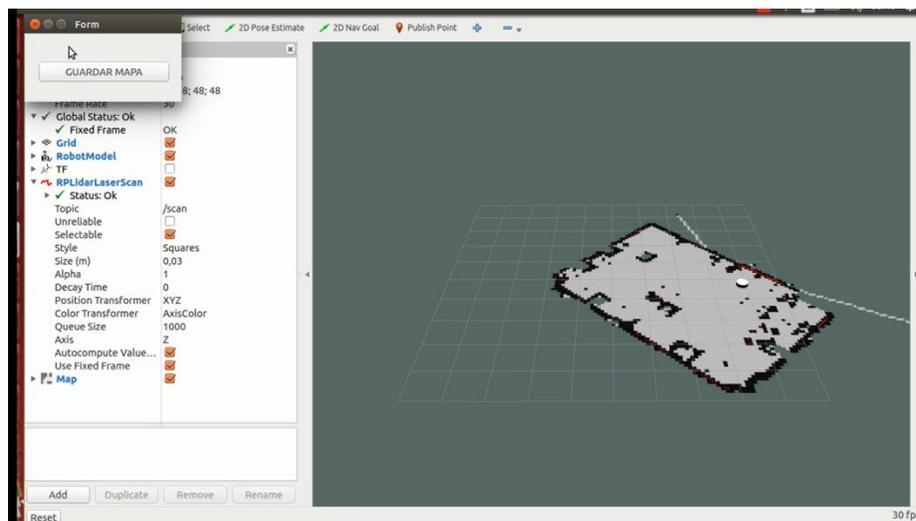
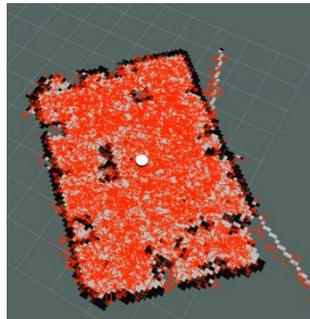


Figura 109 Resultados SLAM CICTE

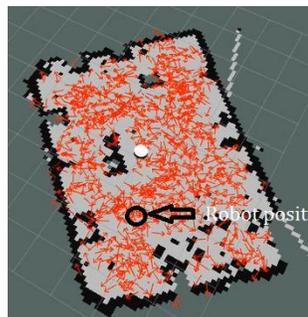
4.4.2.2 Resultados Recuperación de la Ubicación

En la Figura 110 se presenta una secuencia de imágenes para observar el resultado de la ubicación del robot. En la Figura 110.a se tiene el inicio del proceso de ubicación, En la Figura 110.b se muestra como las partículas empiezan a ubicar el robot en un tiempo de 5 segundos, en la Figura 110.c se muestra como las partículas, aunque no se ubican en un punto principal el robot ya se encuentra ubicado transcurrido 19 segundos, y finalmente en la Figura 110.d se muestra al robot ubicado en la posición, donde las partículas son mínimas al transcurrir 23 segundos.



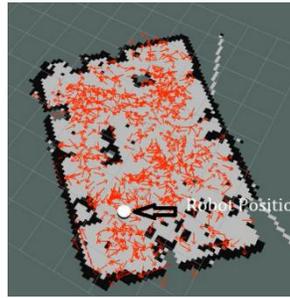
a)

a) Inicio del algoritmo con mapa de 9x6 m $\Rightarrow M_{inicial} = 2160$



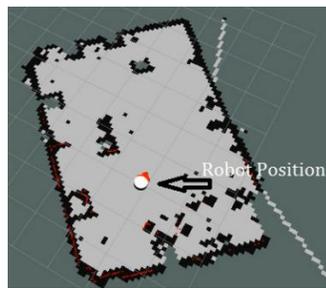
b)

b) $t=5s$



c)

c) t=19 s



d)

d) t=23s

Figura 110 Resultado de Recuperación de la Ubicación CICTE

Como se muestra en los resultados de la Figura 110 el robot logro ubicarse en el mapa en un tiempo menor que en la prueba 1 por ser un mapa más pequeño. Obteniendo buenos resultados de precisión de estimación de la ubicación y tiempo de convergencia.

4.5. Resumen

- La construcción de la Plataforma Robótica Móvil para interiores se desarrolla en 3 módulos. Primero se construye el módulo de estructura y movimiento, donde se construye todos los elementos necesarios para el movimiento del robot y también se finaliza en el soldado y pintado de la estructura. Segundo se construye la tapa del robot,

- se imprime en 3D los soportes de la tapa y se conecta el sensor para poder realizar pruebas. Tercero se construye interfaces para SLAM y Recuperación de la Ubicación, y por ultimo lanzadores que permiten facilitar el uso al usuario.
- Los resultados obtenidos son medidos en comparación del área del mapa conocido, el tiempo de respuesta, y el error de estimación, donde obtenemos que el algoritmo utilizado por el robot, permite recuperar la ubicación del robot en un buen tiempo de convergencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El capítulo expone las conclusiones y recomendaciones a partir del trabajo realizado, y se abordan futuras líneas de investigación que se plantean a partir de las incógnitas generadas en la elaboración del proyecto.

5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó una plataforma robótica móvil para interiores utilizando diseño concurrente, en el cual se pide la selección de conceptos de cada subsistema, los cuales se detallan a continuación: Para el movimiento se utiliza motores a pasos que se encuentran en una configuración de locomoción tipo Skid-Steer. El robot tiene un método de medición del entorno mediante Rplidar 360° que utilizando una programación de algoritmos en el controlador Raspberry Pi 2 Model B, se obtiene la localización y mapeo simultáneo (SLAM) y la recuperación de la ubicación en caso de rapto (Kidnapped Robot Problem).
- Para el desarrollo del control de las funciones de la plataforma robótica móvil se basó en el Sistema Operativo ROS. Se utilizó 4 nodos para el SLAM, que son, el nodo de movimiento de motores, el nodo de odometría del robot, el nodo de activación de la medición del entorno con Lidar y el nodo de SLAM con Héctor Slam.
- Para realizar la recuperación de la ubicación del robot en caso de Rapto, se utilizó 4 nodos, semejantes al proceso anterior, el nodo del movimiento de motores, el nodo de la odometría del robot, el nodo de activación del sensor para medición del entorno y el nodo del método MCL con KDL-Sampling. Se agrega un último nodo que permite la

visualización de los resultados mediante un HMI en el paquete de visualización de datos de Ros (Rviz).

- Analizando los resultados de SLAM, podemos concluir que los mapas creados por la plataforma robótica móvil tienen un alto nivel de parentesco con el lugar mapeado, con un porcentaje de error del 3,83%, analizado a partir de las medidas principales del mapa, además, no posee errores comunes como la superposición de zonas del mapa, o resolución de baja calidad. Por lo cual se concluye que en cuestión de SLAM el robot tiene buena precisión, exactitud y robustez. Agregando la función de permitir Guardar el mapa, podemos almacenar una gran cantidad de mapas para el uso del robot.
- En la Recuperación de la ubicación del robot en caso de Rapto (Kidnapped Robot Problem), podemos obtener que los tiempos necesarios para la recuperación de la ubicación depende directamente del área de la superficie del mapa conocido y que para este robot son tiempos bajos, obteniendo tiempos de recuperación menores a un minuto en caso de un mapa de 120 metros cuadrados. Además, se tiene un error máximo de 0,12% con respecto al mapa completo y un máximo de 4,55% de error en un eje medido.
- Finalmente, el desarrollo del proyecto ha permitido generar conocimiento y experiencia sobre robótica móvil para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por tal motivo es importante continuar con las investigaciones sobre robótica móvil para la mejora de la sociedad.

5.2.Recomendaciones

- Para realizar el diseño concurrente es importante tener claros los módulos que se incorporan a la plataforma robótica móvil, y como la obtención de los módulos viene

ligado a las características técnicas obtenidas por el cliente se debe realizar un buen estudio de los requerimientos iniciales del cliente.

- Se puede realizar la recuperación de la ubicación del robot en caso de rapto, mediante otro tipo de algoritmos. Este proyecto fue realizado mediante un sensor de medición de distancia en un plano 2D, utilizando teorías probabilísticas para la ubicación por puntos en el plano 2D, pero se puede utilizar técnicas de visión artificial para realizar el mapa y la recuperación de la ubicación del robot.
- Es importante que para que el robot tenga una autonomía total, su controlador tiene que ser de altas prestaciones, porque el robot tiene que realizar todas sus funciones dentro del procesador de su controlador sin usos de computadoras externas, ya que si por alguna razón o un ruido del sistema, se pierde la comunicación el robot, éste perdería su autonomía.
- Es importante continuar la línea de investigaciones sobre robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para mejorar los conceptos obtenidos hasta ahora sobre la autonomía de robots y generar investigación que permita tanto al Ecuador como al mundo mejorar la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Real-time video stabilization without phantom movements for micro aerial vehicles. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1, 1-13.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2014). Robust video stabilization based on motion intention for low-cost micro aerial vehicles. *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. Barcelona, Spain.
- Aguilar, W. G., & Angulo, C. (2016). Real-Time Model-Based Video Stabilization for Microaerial Vehicles. *Neural Processing Letters*, 43(2), 459-477.
- Aguilar, W. G., & Morales, S. (2016). 3D Environment Mapping Using the Kinect V2 and Path Planning Based on RRT Algorithms. *Electronics*, 5(4), 70.
- Aguilar, W. G., Abad, V., Ruiz, H., Aguilar, J., & Aguilar-Castillo, F. (2017). RRT-Based Path Planning for Virtual Bronchoscopy Simulator. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 155-165).
- Aguilar, W. G., Angulo, C., & Costa-Castello, R. (2017). Autonomous Navigation Control for Quadrotors in Trajectories Tracking. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 287-297).
- Aguilar, W. G., Casaliglla, V. P., Pólit, J. L., Abad, V., & Ruiz, H. (2017). Obstacle Avoidance for Flight Safety on Unmanned Aerial Vehicles. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 575-584).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Angulo, C. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers and Saliency Maps. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 563-574).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Abad, V., Ruiz, H., Parra, H., & Lopez, W. (2017). Cascade Classifiers and Saliency Maps Based People Detection. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 501-510).

- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., Ruiz, H., & Parra, H. (2017). Real-Time Detection and Simulation of Abnormal Crowd Behavior. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 420-428).
- Aguilar, W. G., Luna, M. A., Ruiz, H., Moya, J. F., Luna, M. P., Abad, V., & Parra, H. (2017). Statistical Abnormal Crowd Behavior Detection and Simulation for Real-Time Applications. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 671-682).
- Aguilar, W. G., Luna, M., Moya, J., Abad, V., Parra, H., & Ruiz, H. (2017). Pedestrian Detection for UAVs Using Cascade Classifiers with Meanshift. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.
- Aguilar, W. G., Morales, S., Ruiz, H., & Abad, V. (2017). RRT* GL Based Optimal Path Planning for Real-Time Navigation of UAVs. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 585-595).
- Aguilar, W. G., Morales, S., Ruiz, H., & Abad, V. (2017). RRT* GL Based Path Planning for Virtual Aerial Navigation. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 176-184).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). On-Board Visual SLAM on a UGV Using a RGB-D Camera. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 298-308).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Real-Time 3D Modeling with a RGB-D Camera and On-Board Processing. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 410-419).
- Aguilar, W. G., Rodríguez, G. A., Álvarez, L., Sandoval, S., Quisaguano, F., & Limaico, A. (2017). Visual SLAM with a RGB-D Camera on a Quadrotor UAV Using on-Board Processing. En *Lecture Notes in Computer Science* (págs. 596-606).
- Aguilar, W. G., Salcedo, V. S., Sandoval, D. S., & Cobeña, B. (2017). Developing of a Video-Based Model for UAV Autonomous Navigation. En *Communications in Computer and Information Science* (págs. 94-105).

- Aguilar, W. G., Verónica, C., & José, P. (2017). Obstacle Avoidance Based-Visual Navigation for Micro Aerial Vehicles. *Electronics*, 6(1), 10.
- Aguilar, W. G., Verónica, C., & José, P. (2017). Obstacle Avoidance for Low-Cost UAVs. *IEEE 11th International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. San Diego.
- Avion Insurance. (2018). *Avion Insurance*. Obtenido de <https://www.avioninsurance.com/>: <https://www.avioninsurance.com/uav-drone-insurance/>
- Baño , A. A. (2003). *Análisis y Diseño del Control de Posición de un Robot Móvil con Tracción Diferencial*. Universidad Rovila y Virgili.
- Bares, J., & Wettergreen, D. (1999). *II: technical description, results and lessons learned*. International Journal of Robotics Research.
- Berrío Pérez, J. (2012). *Mapeo y Localización simultánea de un robot móvil en ambientes estructurados basado en integración sensorial*. Cali: Universidad del Valle.
- Bräunl, T. (1998). *Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embedded Systems*. Springer.
- Brown. (1997). *A single wheel gyroscopically stabilized robot*. Proceedings IEEE Int. Conference on Robotics and Automation.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico D.F: Mc Graw Hill.
- Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing [5th ed]*. New York: The Guilford Press.
- Colin, A. (1989). *Genghis, a six legged autonomous walking robot*. Massachusetts Institute of Technology.
- 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.

- Díaz Abreu, M. L. (2015). *ESTUDIO DEL FILTRO DE PARTÍCULAS Y DE LA EVOLUCIÓN DIFERENCIAL APLICADOS AL PROBLEMA DE SEGUIMIENTO DE OBJETOS EN VIDEO*. Mexico.
- Fox, D. (2002). KLD-sampling: Adaptive particle filters. *Advances in Neural Information processing Systems*, 713-720.
- 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.
- Giralt, G., & Sobek , R. (1979). A multi-level planning and navigation system for a mobile robot. *WCAI*.
- Granosik, G., & Borenstein, J. (2005). Integrated joint actuator for serpentine robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 10(5), 473-481.
- Guano Chicaiza, M. S., & Sevilla Riofrío, A. W. (2015). *Diseño y Construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de Manufactura*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Ismail, I. B. (2017). *Detection of kidnapped robot problem in Monte Carlo localization based on the natural displacement of the robot*.
- Kalman, R. E. (1960). A new Approach to Linear Filtering and Prediction Problems . *Journal of Basic Engineering (ASME)*, 35.

- Kohlbrecher, S., Von Stryk, O., Meyer, J., & Klingauf, U. (2011). A flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation. *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium*.
- Kuipers, B., Nilsson, N. J., & Feigenbaum, E. (2017). Shakey: From Conception to History. *AI MAGAZINE*, 88.
- Kurfess, T. (2005). *Robotics and automation handbook*. CRC press.
- Mattamala Aravena, M. (2013). *Filtro de Kalman extendido con el robot khepera*. Chile: Universidad de Chile.
- Microkits. (2018). www.microkitselectronica.com. Obtenido de MicroKits: <https://www.microkitselectronica.com/rueda-omnidireccional-60mm-mecanum-x-4.html>
- Microsoft. (2018). <https://support.xbox.com/>. Obtenido de Microsoft: <https://support.xbox.com/es-EC/xbox-360/kinect/turn-kinect-features-on-or-off>
- Muñoz, V., Ollero, A., Prado, M., & Simon, A. (1994). Mobile robot trajectory planning with dynamic and kinematic constraints . *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2802-2807.
- Ortigoza, S., & Sánchez, G. (2007). *Una panorámica de los robots móviles*. Zulia, Venezuela: Télématique.
- Ortiz, A. (2014). *Navegación para robots móviles*. Palma de Mallorca.
- Perez , J. S. (2012). *Mapeo y Localización simultánea de un robot móvil en ambientes estructurados basados en integración sensorial*. Cali: Valle del Cauca.
- Pérez, D. (2006). Sensores de distancia por ultrasonidos. *ALCABOT Robóticaem La Universidad de Alcalá*.
- RobotShop. (29 de 03 de 2018). <https://www.robotshop.com/>. Obtenido de robotshop: <https://www.robotshop.com/en/rplidar-360-laser-scanner.html>

- Ruiz, P., Garro, J. F., & Soto, G. J. (2014). El Uso de Imágenes Lidar en Costa Rica: Casos de Estudio Aplicados en Geología, Ingeniería y Arqueología. *Revista Geológica de América Central*, 51.
- Sánchez, L., Ordoñez, J., & Infante, S. (2013). *Filtro de Kalman Extendido y Filtro de Partículas Kalman Extendido para Problemas de Estimación No Lineal*. Valencia, Venezuela: Universidad de Carabobo.
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Massachusetts Institute of Technology.
- SLAMTEC. (2016). *RPLIDAR AIM8 Datasheet*. Shanghai: SLAMTEC.
- Soria, C., Carelli, R., Kelly, R., & Zannatha, J. (2004). Control de robots Cooperativos por Medio de Visión Artificial. *XVI Congreso de La Asociación Chilena de Control Automático*, 223.
- Thompson, A. M. (1977). *The navigation system of the JPL robot*. California: Jet Propulsion Lab., California Inst. of Tech.; Pasadena, CA, United States.
- Thrun, S. (2000). *Probabilistic robotics*. Communications of the ACM.
- Todea, J. L. (2013). *Técnicas, Modelos y Análisis de un Robot Autónomo*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Luján.
- Torres Medina, F. (2004). La robótica en los albores del siglo XXI. *Universidad de Verano Rafael Altamira de la Universidad de Alicante*.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- USTA/VANGUARDIA LIBERAL. (02 de Febrero de 2014). <http://www.vanguardia.com/>.
Obtenido de vanguardia: <http://www.vanguardia.com/actualidad/mundo/244851-novedoso-robot-movil-submarino>
- Wang, T., Wu, Y., Liang, J., Han, C., Chen, J., & Zhao, Q. (2015). Analysis and experimental kinematics of a skid-steering wheeled robot based on a laser scanner sensor. *Sensors(Switzerland)*, 9681-9702.

Wikipedia. (28 de 12 de 2016). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org:https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_Kalman

ANEXOS

ANEXO A
MANUAL DE USUARIO

ANEXO B

DATOS TÉCNICOS – RPLIDAR A1 M8

ANEXO C

DATOS TÉCNICOS – DRIVERS A4988

ANEXO D
PLANOS MECÁNICOS

ANEXO E
PLANOS ELÉCTRICOS

ANEXO F

INTERCONEXIÓN DE NODOS EN EL SISTEMA ROS