



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE UBICACIÓN EN LA
PLATAFORMA ROBÓTICA PARA EXTERIORES TELEOPERADA
DEL LABORATORIO DE MANUFACTURA**

**AUTORES: GARZÓN JARAMILLO, PEDRO MIGUEL
OBANDO MALDONADO, CARLOS ANDRÉS**

DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2016



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

CERTIFICACIÓN.

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE UBICACIÓN EN LA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA EXTERIORES TELEOPERADA DEL LABORATORIO DE MANUFACTURA”***. Realizado por los señores **GARZÓN JARAMILLO PEDRO MIGUEL** y **OBANDO MALDONADO CARLOS ANDRÉS**, ha sido revisado en su totalidad, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a los señores **GARZÓN JARAMILLO PEDRO MIGUEL** y **OBANDO MALDONADO CARLOS ANDRÉS** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 23 de junio del 2016

Atentamente,

MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **GARZÓN JARAMILLO PEDRO MIGUEL** y **OBANDO MALDONADO CARLOS ANDRÉS**, con cédula de identidad N° **171989774-4** y **171855237-3** respectivamente, declaramos que éste trabajo de titulación ***“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE UBICACIÓN EN LA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA EXTERIORES TELEOPERADA DEL LABORATORIO DE MANUFACTURA.”*** Ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que éste trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 23 de junio del 2016

Atentamente:

Garzón Jaramillo
Pedro Miguel
C.C. 171989774-4

Obando Maldonado
Carlos Andrés
C.C. 171855237-3



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **GARZÓN JARAMILLO PEDRO MIGUEL** y **OBANDO MALDONADO CARLOS ANDRÉS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación ***“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE UBICACIÓN EN LA PLATAFORMA ROBÓTICA PARA EXTERIORES TELEOPERADA DEL LABORATORIO DE MANUFACTURA.”*** Cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 23 de junio del 2016

Atentamente:

Garzón Jaramillo

Pedro Miguel

C.C. 171989774-4

Obando Maldonado

Carlos Andrés

C.C. 171855237-3

Dedicado a nuestras familias quienes con su apoyo hicieron posible la culminación de esta etapa.

Carlos y Pedro

Agradecimiento

Agradecemos de todo corazón a nuestros padres quienes con su paciencia y cariño supieron forjar nuestro carácter e inculcaros el deseo de superación; siempre estuvieron ahí para brindarnos su apoyo incondicional.

A nuestras familias por creer siempre en nuestras capacidades y ofrecernos toda su ayuda. A los nuevos amigos, gente con ideales similares que estuvieron prestos a brindarnos una mano y a los amigos de siempre que son ya parte de nuestra familia.

También, queremos agradecer al grupo de docentes del Laboratorio de Procesos de Manufactura por aportarnos su experiencia y conocimientos, una mención especial merece nuestro director de proyecto de titulación MSc. David Loza quien supo guiarnos a la culminación de este objetivo.

Gracias por ser parte de nuestras vidas.

Carlos y Pedro

Índice general

Certificación.....	ii
Autoría de responsabilidad	iii
Autorización.....	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	xvii
Abstract	xviii
Capítulo 1.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.2.1. Historia.....	2
1.2.2. Robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	5
1.3. Objetivos.....	8
1.3.1. Objetivo general.....	8
1.3.2. Objetivos específicos	8
1.4. Alcance.....	8
1.5. Justificación e importancia	9
1.6. Estructura del documento.....	9
Capítulo 2.....	11

2.1. Robótica móvil.....	11
2.2. Navegación.....	12
2.2.1. Sistemas y métodos de posicionamiento.....	12
2.2.2. Navegación en robótica móvil	13
2.3. Percepción.....	15
2.3.1. Sensores.....	15
2.3.2. Extracción de características.....	20
2.4. Localización.....	25
2.5. Localización Global.....	26
2.5.1. GPS	26
2.5.2. Odometría	28
2.6. Localización Local.....	29
2.6.1. Mapeo del entorno.....	29
2.6.2. Localización por marcas.....	30
2.6.3. Localización SLAM.....	31
2.7. Planificación de trayectoria	34
2.7.1. Muestreo o mapa de vías.....	34
2.7.2. Trayectoria basada en celdillas.....	35
2.7.3. Campo potencial	37
2.8. Control de movimiento	38
2.9. Resumen.....	39
Capítulo 3.....	40
3.1. Definición del concepto	40
3.1.1. Definición de las necesidades.....	40
3.1.2. Definición de las características técnicas.....	41
3.1.3. QFD.....	41

3.2. Factibilidad y planeación.....	43
3.2.1. Estructura funcional	43
3.3. Módulo 1. Ubicación.....	44
3.3.1. Subsistema 1. Ubicación Global.....	44
3.3.2. Subsistema 2. Ubicación local	49
3.3.3. Diseño Final.....	53
3.4. Módulo 2. Monitoreo.....	68
3.4.1. Subsistema 1. Cámara a bordo.....	68
3.4.2. Subsistema 2. Interfaz.....	72
3.4.3. Diseño final.....	75
3.5. Módulo 3. Estructura	77
3.5.1. Subsistema 1. Ruedas	77
3.5.2. Subsistema 2. Cubierta	84
3.5.3. Diseño final.....	87
3.6. Módulo 4. Adquisición y mando	93
3.6.1. Alternativas para diseño	93
3.6.2. Evaluación y selección de alternativas.....	95
3.6.3. Diseño final.....	97
3.7. Módulo 5. Teleoperación.....	99
3.7.1. Alternativas para diseño	99
3.7.2. Evaluación y selección de alternativas.....	100
3.7.3. Diseño final.....	100
3.8. Definición concepto final	102
3.9. Resumen.....	104
Capítulo 4.....	106
4.1. Sensor LIDAR.....	106
4.1.1. Carcasa y partes impresas	106

4.1.2. Circuitos electrónicos.....	107
4.1.3. Ensamble	108
4.2. Estructura	109
4.2.1. Maquinado de ejes.....	109
4.2.2. Maquinado e incorporación de acoples	109
4.2.3. Adaptación de la estructura.....	110
4.2.4. Sellado de estructura	111
4.3. Circuitería	112
4.3.1. Caja de control.....	112
4.3.2. Router y cámara web	113
4.3.3. Cableado y protección de seguridad	113
4.4. Software y control.....	114
4.4.1. Interfaz Humano-Máquina	114
4.4.2. SLAM	115
4.4.3. Sistema de visión artificial	116
4.5. Pruebas y resultados	116
4.5.1. Primera evaluación	117
4.5.2. Segunda evaluación.....	118
4.5.3. Tercera evaluación.....	119
4.5.4. Cuarta evaluación	120
4.5.5. Quinta evaluación	121
4.5.6. Sexta evaluación	123
4.5.7. Especificaciones técnicas de la plataforma.....	124
4.6. Resumen	125
Capítulo 5.....	126
5.1. Conclusiones.....	126
5.2. Recomendaciones	128

Bibliografia..... 130

Índice de figuras

Figura 1: Robot “Shakey” de Stanford Research Institute.....	3
Figura 2: Vehículo autónomo VaMoR.....	4
Figura 3: Robot móvil autónomo para hospitales HELPMATE.....	4
Figura 4: Sojourner Rover en Marte.	5
Figura 5: Robot móvil experimental 8x8 articulado.	5
Figura 6: Robot todo terreno con sistema ROCKER-BOGIE.	6
Figura 7: Robot móvil MI-T-NATOR.	6
Figura 8: Plataforma robótica para exteriores del Laboratorio de Manufactura.....	7
Figura 9: Esquema de referencia para los sistemas de robots móviles.	12
Figura 10: Ejemplo de navegación un Robot Móvil.	13
Figura 11: Estructura de control de navegación.....	14
Figura 12: Representación del funcionamiento de un sensor LIDAR.	16
Figura 13: Esquema de vuelo para mapeado con LIDAR y sistemas coordenados de cada componente.	18
Figura 14: Imagen típica de un mapping realizado con un sensor láser en 2D, las líneas sobre los puntos medidos indican la incertidumbre.	18
Figura 15: Principio de funcionamiento de un sonar	19
Figura 16: Disposición sonar en forma de anillo.	20
Figura 17: Percepción, desde el entorno hacia la interpretación de la escena	21
Figura 18: Estimando una línea a partir de los datos de un sensor.	22
Figura 19: Filtrado de datos y extracción de línea por RANSAC.....	23
Figura 20: Combinación de características mediante histogramas.	24
Figura 21 : Proceso de la extracción de características.....	25
Figura 22: Cálculo de la posición basado en GPS.	28
Figura 23: Incertidumbre en la Odometría.....	29
Figura 24: Localización por marcas en forma de Z.	31
Figura 25: Trazado del camino. Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	34
Figura 26: Descomposición en celdas y camino óptimo.....	36
Figura 27: Despliegue de los nodos para la búsqueda primero en anchura.	36
Figura 28: Despliegue de los nodos para la búsqueda primero en profundidad.	37
Figura 29: Camino trazado mediante la estrategia de campo potencial. Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)	37
Figura 30: Arquitectura de control de un robot. Basado en: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	38
Figura 31: Casa de la calidad para el sistema de ubicación	42
Figura 32: Pines del sensor GPS EM-506. Fuente: (Globalsat Technology Corporation, 2013)	48
Figura 33: Esquema de conexión entre el sensor EM-506 y la placa Raspberry.....	48
Figura 34: Pines del sensor LIDAR-Lite. Fuente: (PULSED LIGHT LLC, 2014).....	52
Figura 35: Esquema de funcionamiento del sensor LIDAR	53
Figura 36: Motor paso a paso NEMA 17	54
Figura 37: Anillo colector.	54
Figura 38: Corte transversal del sensor. Obsérvese como el rodamiento mantiene los elementos mientras soporta el peso de los mismos.....	55
Figura 39: Diagrama de Estimación de la viscosidad cinemática.....	56

Figura 40: Sistema de giro en 360° para el sensor LIDAR-Lite v2.....	60
Figura 41: Resultado del análisis estático realizado al soporte del sensor LIDAR.....	60
Figura 42: Resultados del análisis estático para la estructura de movimiento del sensor.....	61
Figura 43: Cubierta para el sensor LIDAR	62
Figura 44: Tapa del sensor LIDAR.....	62
Figura 45: Acople entre el sistema y la cubierta.....	63
Figura 46: Resultados de deformación para el análisis estático realizado a la estructura del sensor	64
Figura 47: Sensor LIDAR completamente ensamblado.....	64
Figura 48: Esquema de conexión interna de los sensores (a) GPS EM-506, (b) placa de conexión y (c) Lidar Lite V2.....	65
Figura 49: Diagrama esquemático y representación 3D del circuito de sensores.....	65
Figura 50: Diagrama de conexión del controlador A4988. (Tomado de https://www.pololu.com/product/1182)	66
Figura 51: Diagrama esquemático y representación 3D del circuito del controlador	66
Figura 52: Diagrama de flujo para el funcionamiento del sensor GPS-LIDAR	67
Figura 53: Cámara web ANERA (Tomado de https://www.alibaba.com)	71
Figura 54: Plataforma ROS.....	73
Figura 55: Arquitectura de trabajo ROS	74
Figura 56: Qt	74
Figura 57: Diseño de un diagrama básico de la interfaz HMI	76
Figura 58: Soporte y domo para la cámara	76
Figura 59: Estructura y grada (medidas).....	80
Figura 60: Método gráfico para el cálculo del ángulo crítico	81
Figura 61: Geometría del ángulo crítico	81
Figura 62: Plataforma realizando un giro (sistema skid steer).....	87
Figura 63: Diagrama básico del eje a diseñar	88
Figura 64: Diagrama de fuerza cortante para el diseño del eje	89
Figura 65: Diagrama de momento flector para el diseño del eje	89
Figura 66: Medidas finales eje.....	90
Figura 67: Representación 3D del eje diseñado	90
Figura 68: Acople eje-rueda.....	91
Figura 69: Controlador de motores DC Monster Moto Shield	92
Figura 70: Esquema de conexión del controlador de los motores	92
Figura 71: Diagrama de flujo para el control de motores	93
Figura 72: Soporte para la placa Raspberry	98
Figura 73: Caja de control.....	98
Figura 74: Diagrama de conexión para la caja de control.....	99
Figura 75: Topología de la red WLAN usada en la plataforma.....	101
Figura 76: Descripción de componentes	102
Figura 77: Diagrama de procesos compartidos	103
Figura 78: Componentes internos impresos; (a) Engrane del motor, (b) Soporte del sensor LIDAR (c) Engrane del sensor y (d) Estructura interna de anclaje para el motor y el colector.....	106

Figura 79: Componentes externos impresos; (a) tapa de la carcasa con rodamiento instalado, (b) cubierta del sensor y (c) carcasa.	107
Figura 80: Armado y conexión de las placas de circuito electrónico; (a) placa de conexión, (b) placa Lidar, (c) soldadura y (d) etiquetado de cables.....	107
Figura 81: Ensamble del sensor LIDAR; (a) tapa con el sensor GPS, (b) mecanismo interno y (c) ensamble.....	108
Figura 82: Maquinado y colocación de ejes en la plataforma; (a) maquinado del eje, (b) eje terminado y (c) eje acoplado en la estructura.....	109
Figura 83: Maquinado y colocación de acoples para las ruedas de la plataforma; (a) maquinado acople, (b) acople terminado, (c) ajuste con la prensa y (d) llanta con el acople y eje.	110
Figura 84: Construcción e instalación de parachoques; (a) soldadura, (b) instalación parachoques delantero, (c) instalación parachoques trasero y (d) parachoques delantero terminado.	110
Figura 85: Inclusión de material sellante en las juntas de la estructura y pintado de la plataforma; (a) llenado de espacios con Sika-boom, (b) sellado con Sika Bond AT-Metal, (c) recubrimiento pintura anticorrosiva, (d) recubrimiento pintura batepiedra, (e) pegado del empaque parte inferior (f) cerrado de la parte inferior.	111
Figura 86: Armado de la caja de control y ubicación de la misma dentro de la plataforma; (a) circuitos de control, (b) armado de la caja de control. (c) instalación de la caja de control y (d) puertos para dispositivos externos de la caja de control y ventilador.....	112
Figura 87: (a) colocación de Router y (b) cámara web en la plataforma.....	113
Figura 88: (a) cableado de los motores en la plataforma y (b) botón de paro de emergencia e interruptor de encendido con llave instalados en la plataforma.....	113
Figura 89: Interfaz Humano-Máquina, la disposición de las ventanas es: (1) Visualización del mapa generado y modelo 3D del la platafrma (2) Imágen de la cámara a bordo y (3) Controles de movimiento del autómeta	114
Figura 90: Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado (a) vista superior, (b) vista del mapa generado y (c) fusión para comparación del mapa.....	115
Figura 91: Uso de procesador, memoria y red en el computador remoto	117
Figura 92: Plataforma realizando SLAM mientras navega por un entorno cerrado.....	123
Figura 93: Códigos QR usados para el control de la plataforma, (a) código para el seguimiento (b) inicia el funcionamiento del sensor LIDAR y (c) detiene el funcionamiento del sensor LIDAR	123

Índice de tablas

Tabla 1: Proceso de la navegación. Fuente: (Ortiz)	14
Tabla 2: Requerimientos o necesidades del consumidor	40
Tabla 3: Características técnicas	41
Tabla 4: Resultados de la matriz QFD	42
Tabla 5: Módulos para diseño	43
Tabla 6: Alternativas para el sensor GPS (Ubicación Global).....	45
Tabla 7: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1, subsistema 1	46
Tabla 8: Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1.....	46
Tabla 9: Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1.....	46
Tabla 10: Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1	46
Tabla 11: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1	47
Tabla 12: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 1, subsistema 1.....	47
Tabla 13: Descripción de pines del sensor EM-506.....	48
Tabla 14: Alternativas para el sensor LIDAR (Ubicación local).....	50
Tabla 15: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1, subsistema 2.....	51
Tabla 16: Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2.....	51
Tabla 17: Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2.....	51
Tabla 18: Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2	51
Tabla 19: Ponderación de impermeabilidad para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2	51
Tabla 20: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 1, subsistema 2.....	52
Tabla 21: Descripción de pines del sensor LIDAR-Lite.....	52
Tabla 22: Cargas aplicadas a la estructura del sensor	63
Tabla 23: Características de la cámara web ANERA	71
Tabla 24: Alternativas para el cambio de neumáticos	78
Tabla 25: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3, subsistema 1	79
Tabla 26: Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1.....	79
Tabla 27: Ponderación de labrado de neumáticos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1.....	79
Tabla 28: Ponderación de facilidad de montaje para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1	79
Tabla 29: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1	79

Tabla 30: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 3, subsistema 1.....	80
Tabla 31: Características de los motores.....	80
Tabla 32: Alternativas para la impermeabilización de la plataforma	85
Tabla 33: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3, subsistema 2	86
Tabla 34: Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2.....	86
Tabla 35: Ponderación de facilidad de manejo para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2	86
Tabla 36: Ponderación de resistencia para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2.....	86
Tabla 37: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2	86
Tabla 38: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 3, subsistema 2.....	87
Tabla 39: Alternativas para el controlador de la plataforma robótica.....	95
Tabla 40: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4.....	96
Tabla 41: Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 4.....	96
Tabla 42: Ponderación de velocidad del procesador para las alternativas de diseño al módulo 4.....	96
Tabla 43: Ponderación de flexibilidad de operación para las alternativas de diseño al módulo 4.....	96
Tabla 44: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 4.....	96
Tabla 45: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 4	97
Tabla 46: Características de la placa de desarrollo Raspberry.....	97
Tabla 47: Descripción de componentes y módulos.....	102
Tabla 48: Tabla de resultados	104
Tabla 49: Tensión en la batería mientras se utiliza la plataforma.....	118
Tabla 50: Tensión en la batería antes y después del uso de la plataforma.....	119
Tabla 51: Resultados de la prueba de funcionamiento de la plataforma en trayectoria rectilínea	119
Tabla 52: Resultados en trayectoria rectilínea luego de ajustar el valor del PWM.....	120
Tabla 53: Resultados para la prueba de giro de la plataforma sobre distintos terrenos	120
Tabla 54: Mediciones del sensor LIDAR con obstáculos a distancias reguladas	122
Tabla 55: Mediciones corregidas por software del sensor LIDAR con obstáculos a distancias reguladas	122

Resumen

Considerando el potencial que tiene la robótica móvil en la actualidad para permitir al ser humano explorar lugares hostiles y de difícil acceso, el proyecto pretende establecer un marco que permita generar conocimientos en robótica con fines de reconocimiento y exploración. Para el efecto se realizó el diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica móvil operada de forma remota, cuyo objetivo es el de incorporar un robusto sistema de ubicación y orientación. En la primera parte del documento se habla sobre la robótica móvil, navegación, operación remota, localización, mapeo simultáneos (SLAM) y sensores; también, se describe los métodos o formas de solventar los problemas relacionados con el tema. La segunda parte, se basa en el desarrollo y selección de alternativas de diseño, para su posterior implementación, además, se llevó a cabo un análisis y estudio acerca del sistema operativo robótico (ROS). Luego, se procedió con la construcción de una plataforma en acero y con grado medio de impermeabilidad para que sea resistente a las condiciones de exploración en intemperie. Adicionalmente, se desarrolló un sensor LIDAR que ofrece localización constante mediante mapeo de la zona y transmisión de video en tiempo real. Finalmente, se efectuó pruebas donde se mide la funcionalidad de la plataforma en diferentes entornos y se redactó las respectivas conclusiones y recomendaciones para trabajos a futuro.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA MÓVIL**
- **LOCALIZACIÓN Y MAPEO SIMULTÁNEO (SLAM)**
- **OPERACIÓN REMOTA**
- **SISTEMA OPERATIVO ROBÓTICO (ROS)**
- **LIDAR**

Abstract

Today, mobile robotics has a great potential to allow the humans the exploration of hostile and inaccessible places, this work aims to establish a framework to generate knowledge in robotics for reconnaissance and exploration. For this purpose, a prototype of a tele-operated mobile robotic platform was designed and built, the main objective is to design and mount a robust ubication and orientation system on the platform. The first part of this document talks about mobile robotics, sensors, remote operation, simultaneous localization and mapping (SLAM) and navigation, it also describes some methods of path planning and movement control. The second part bases on the study and selection of design alternatives which are implemented later, additionally, the possibility of using ROS (Robot Operating System) is discussed. Then, the construction of the weatherproof metallic esturcture is described. Also, the development of a LIDAR sensor is explained, from the sensor data the system is able to créate a map of the area, knowing the robot location and orientation relative to his environment. The system offers real time video transmission too. Finally, several tests were performed to probe the platform functionality on some terrain, the conclussions and recommendations fot future jobs are exposed at the end.

KEYWORDS:

- **MOBILE ROBOTICS**
- **SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING (SLAM)**
- **REMOTE OPERATION**
- **ROBOT OPERATING SYSTEM (ROS)**
- **LIDAR**

Capítulo 1

Introducción

En el capítulo se redacta los antecedentes que motivan el desarrollo de un sistema de ubicación en la plataforma robótica para exteriores teleoperada del laboratorio de manufactura. Se presenta el problema y la importancia de su resolución. Para ello, se plantea una investigación de la plataforma existente a fin de encontrar oportunidades de mejora, de acuerdo a ello se definen los objetivos a cumplir y se determina el alcance a cubrir.

1.1. Planteamiento del problema

La robótica móvil genera gran interés a nivel mundial por su vasta cantidad de aplicaciones. Robots móviles son usados para explorar lugares peligrosos e inhóspitos, automatizar procesos de transporte en plantas de manufactura y en el ámbito militar se usan para desarmar bombas y transportar materiales peligrosos. Debido a ello existen bastas investigaciones en el tema lo que ha conllevado a un avance tecnológico durante los últimos años. Contrario a ello, en el Ecuador los avances en materia de robótica móvil no son realmente considerables.

Se han realizado algunos proyectos en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, dentro del campo de la robótica móvil, uno de ellos es el desarrollo de una plataforma robótica para exteriores teleoperada (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015), la cual es actualmente utilizada en el laboratorio de manufactura. Para su construcción se tuvieron en cuenta características como la capacidad de sortear terrenos difíciles y contar con un mando a distancia.

Sin un sistema que permita al operario conocer la ubicación exacta de la plataforma, su control se vuelve un poco inexacto sobre todo cuando la plataforma sale de la vista de quien la está operando. Además, al sortear terrenos complicados, el no contar con un sistema que permita detectar posibles obstáculos lleva a que la plataforma sufra colisiones permanentemente.

1.2. Antecedentes

A lo largo de la historia el ser humano siempre ha tenido la necesidad de optimizar o mejorar el uso de los recursos o materiales de su entorno con el fin de lograr un mejor y más seguro estilo de vida, por tal motivo, se ha visto en la necesidad de automatizar ciertas actividades.

Los robots son máquinas diseñadas para servir a la humanidad en todo tipo de tareas. Existe una gran variedad de robots, de los cuales este trabajo pretende centrar su estudio en la robótica móvil y sobre todo en las posibilidades de autonomía que brinda la misma.

En el campo de la robótica móvil, el posicionamiento y orientación de un robot es un problema que se intenta solucionar usando diferentes técnicas, siendo hoy en día un tema de gran interés; la capacidad de un robot móvil para determinar su ubicación o estado de localización en el espacio es una tarea imprescindible para lograr una navegación autónoma.

1.2.1. Historia

La robótica móvil como tal comenzó a ser un campo de investigación por la complejidad de la misma y el amplio conocimiento que este conlleva, a finales de los 60's con el proyecto Shakey en el SRI (Stanford Research Institute). El documento "A Mobile Automaton; An Application of Artificial Intelligence Techniques" (Nilsson, 1969), ya mencionaba la percepción, el mapeado del entorno, la planificación del movimiento y la noción de arquitectura de control. Estas fueron de hecho, el núcleo de la investigación en robótica móvil en las siguientes décadas con el fin de lograr una amplia variedad de tareas en lugar de unos pocos específicos.

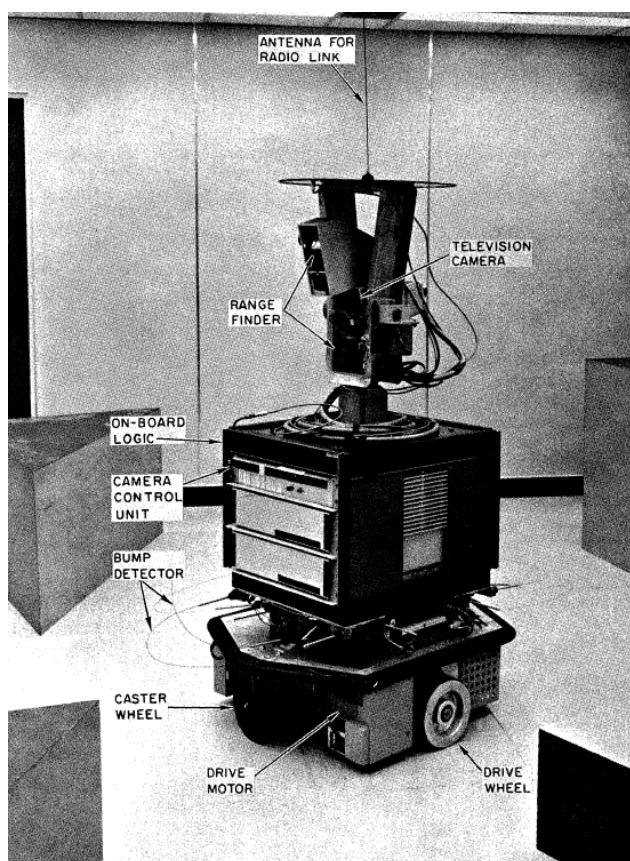


Figura 1: Robot "Shakey" de Stanford Research Institute.

Fuente: (Nilsson, 1969)

En los 80's hubo una gran acogida por los proyectos de robótica móvil, y según la necesidad, se hizo frente a la realidad del mundo físico real de tal manera que aparecieron problemas que promovieron nuevas direcciones de investigación, actualmente se alejan del concepto original en el que el robot era solo una aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial.

Fueron los equipos de S.Tsugawa (Tsukuba Mechanical Engineering Laboratory) en 1977 y E. Dickmanns (Universidad Bundeswehr de Munich) en 1983 quienes presentaron los primeros prototipos de vehículos automáticos. Se trataba de vehículos que básicamente eran capaces de seguir un carril de autopista e incluso cambiar entre carriles. (Dickmanns, 2011)



Figura 2: Vehículo autónomo VaMoR.

Fuente: (Ernst Dickmanns, 1983)

En 1990, Joseph Engelberger, creador del brazo robótico industrial, realizó una investigación con sus colegas para diseñar los primeros robots móviles autónomos disponibles en el mercado de los hospitales. Este robot era capaz de desplazarse por los pasillos de un hospital esquivando obstáculos. (Robotics, n.d.).



Figura 3: Robot móvil autónomo para hospitales HELPMATE.

Fuente: (Robotics, n.d.)

En 1997 aterrizó en Marte el Mars Pathfinder con un robot móvil llamado Sojourner creado por la NASA, este robot fue diseñado para realizar diferentes investigaciones sobre el suelo marciano de forma autónoma puesto que se desconoce el terreno, este tenía una cámara estereoscópica, y varios sensores meteorológicos. (O'Donnell, 1997)

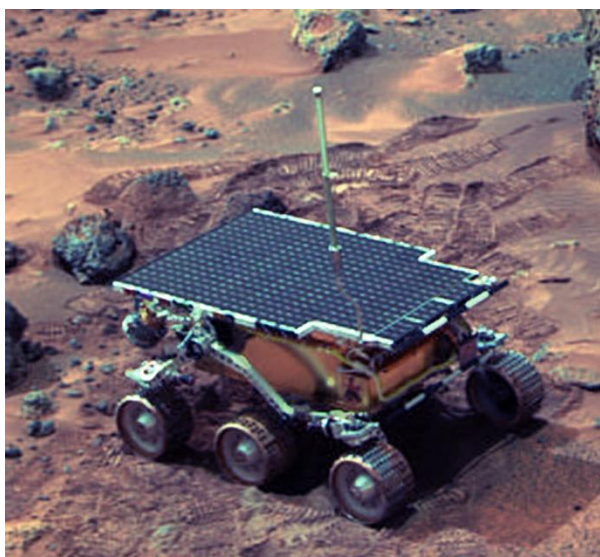


Figura 4: Sojourner Rover en Marte.
Fuente: (O'Donnell, 1997)

1.2.2. Robótica móvil en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

A continuación se cita puntualmente trabajos previos realizados en la Universidad:

- Diseño y construcción de un robot móvil experimental 8x8 articulado para salvar obstáculos (Mohammad Ali Hidalgo, 2014)

Dicho robot dispone de dos vagones unidos por un eje cilíndrico, sensores infrarrojos para detección de obstáculos; su locomoción es mediante transmisión por rodillos de fricción, servomotores en los mecanismos articulados que levantan las ruedas móviles y permiten salvar los obstáculos.

Consta de dos circuitos de control de motores para su activación y control de giro.

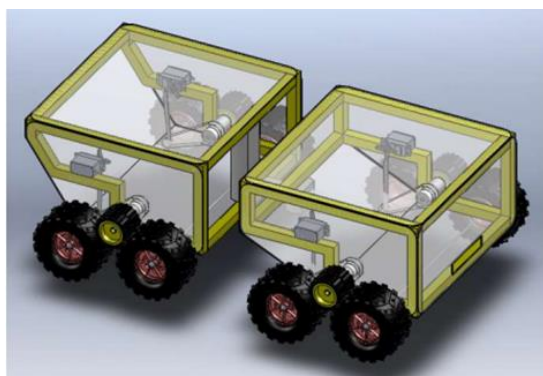


Figura 5: Robot móvil experimental 8x8 articulado.
Fuente: (Mohammad Ali Hidalgo, 2014)

- Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema ROCKER-BOGIE y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE (Quezada Cepeda, 2014)

El robot cuenta con un sistema de suspensión Rocker – Bogie, donde sus dos brazos basculantes conectados mediante un mecanismo diferencial lo ayudan a la movilidad en terrenos irregulares. Tiene capacidad de navegación autónoma, detectando y esquivando objetos; además de tener la posibilidad de una manipulación inalámbrica.

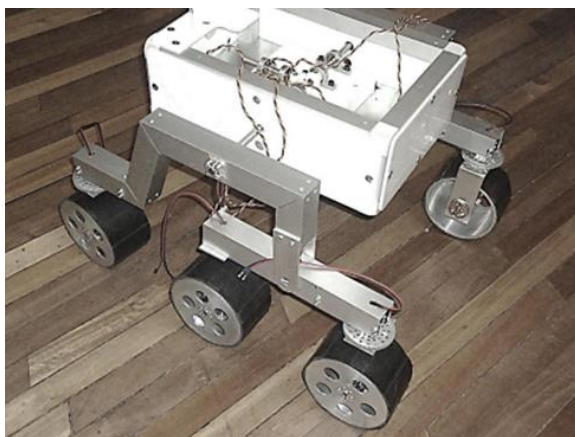


Figura 6: Robot todo terreno con sistema ROCKER-BOGIE.
Fuente: (Quezada Cepeda, 2014)

- Diseño e implementación de un robot móvil autónomo y tele operado para labores agrícolas (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013)

El robot es un prototipo autónomo y tele operado capaz de realizar la fumigación en plantaciones de rosas. Plataforma móvil con arreglo diferencial de 3 ruedas que posee un sistema hidráulico de distribución y aspersión de fungicida.



Figura 7: Robot móvil MI-T-NATOR.
Fuente: (Leon Vasquez & Vasquez Tapia, 2013)

Por último, el proyecto de titulación en el cual se basa el presente trabajo:

- Diseño y Construcción de una plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de Manufactura (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015).

Cuenta con las siguientes características:

- Estructura resistente a factores ambientales.
- Sistema de monitoreo con cámara inalámbrica.
- Alcance estimado de hasta 70 metros.
- Soporta un peso de hasta 40 kilogramos.
- Autonomía hasta 2.5 horas.



Figura 8: Plataforma robótica para exteriores del Laboratorio de Manufactura.

Actualmente, la plataforma es funcional y se usa en el laboratorio de manufactura, pero necesita mejorar ciertas características para desempeñar de manera más eficiente las funciones para las que fue construida.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de ubicación en la plataforma robótica para exteriores teleoperada del laboratorio de manufactura

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de localización y mapeo simultáneo por medio de un algoritmo que permita explorar un lugar sin colisionar.
- Diseñar y ajustar los ejes con un diámetro adecuado de las llantas.
- Resolver problemas de movilidad e impermeabilidad existentes en la plataforma.
- Unificar los sistemas de monitoreo y control en un solo dispositivo por medio de un sistema embebido.
- Realizar pruebas de funcionalidad y efectuar correcciones.

1.4. Alcance

Este proyecto se basa en la ampliación de la plataforma robótica para exteriores teleoperada (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrio, 2015) ya existente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Luego de realizar un análisis sobre la misma se concluyó que se puede añadir lo siguiente:

Se diseñará y ajustará los ejes con un diámetro adecuado de las llantas, de tal manera que, se optimizará el chasis para poder llevar acabo con las necesidades del proyecto, como subir una grada.

Se realizará mejoras en la protección de la plataforma con un sellado hermético para que trabaje normalmente en exteriores; se tomara las medidas correspondientes para proteger a todos los elementos externos para que resistan condiciones climáticas adversas.

Se diseñará una protección para la cámara instalada en la plataforma, también se adaptará un sistema que permita rotar la cámara y así obtener un mayor campo visual.

Se adicionará sensores, tanto un LIDAR como un GPS que permitan obtener información acerca del estado del robot y su localización.

Se usará un solo sistema embebido para la transmisión, recepción y control de señales por el sistema para su visualización en el dispositivo de interfaz.

La plataforma podrá crear un mapa y ubicarse respecto al mismo de manera exacta.

1.5. Justificación e importancia

Uno de los objetivos primordiales en el desarrollo de la plataforma robótica existente fue crear fuentes de investigación que permitan profundizar en nuevas tecnologías en el campo de la robótica móvil en el país. Darle continuidad a un proyecto de esta índole es motivación suficiente para la realización del presente trabajo.

El desarrollo de un sistema de ubicación sin duda mejorará las características de la plataforma y dará un avance a un proyecto que de otra forma habría quedado estancado; beneficiando directamente al laboratorio de manufactura.

Se pretende sentar un precedente gracias al cual toda la comunidad universitaria tendrá una base para desarrollar futuros proyectos que puedan mejorar aún más las capacidades del equipo.

El estudio de la robótica móvil es de gran importancia a nivel mundial, entre las aplicaciones de los robots móviles destacan: acceder a terrenos hostiles y realizar actividades peligrosas o que puedan poner en riesgo la vida de un ser humano; un robot móvil puede brindar asistencia en campo durante la realización de labores militares, patrullaje y desactivación de minas.

1.6. Estructura del documento

El presente documento se estructura en cinco capítulos donde se describirá toda la información relacionada para el desarrollo del sistema de ubicación para la plataforma robótica para exteriores tele operada del laboratorio de manufactura.

El capítulo 2 (Estado del Arte), primero presenta el detalle de los conceptos necesarios acerca de navegación, donde se presenta una breve reseña de la robótica móvil, el proceso de la navegación dentro de la robótica móvil. También se describe la percepción y los sensores capaces de ayudar con la ubicación del robot. Luego se detalla acerca de los diferentes métodos de localización, indicando principalmente que es el GPS, Odometría, Localización por marcas

y SLAM. Se presenta la planificación de trayectoria. Finalmente se menciona el control de movimiento.

El análisis de la plataforma existente es realizado en el Capítulo 3 (diseño), se describen las pruebas realizadas y se revisa todos los sistemas del mismo. También, se detalla el diseño mecánico para la adaptación de los sensores y el arreglo de los ejes para una mayor funcionalidad. Luego se describe el diseño electrónico donde se observa los componentes electrónicos utilizados y los diagramas. Por último se presenta el diseño del sistema de control donde se encuentra la parte del controlador y su programación.

La construcción o adquisición de los elementos necesarios luego de la etapa de diseño es descrita en el capítulo 4 (Construcción y Pruebas). Se detalla el paso a paso del montaje de todos los elementos. Finalmente se observa los resultados de las pruebas realizadas.

Los principales resultados del proyecto de titulación y las conclusiones que genera su realización se sintetizan en el Capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones). Recomendaciones para el trabajo futuro son también incluidas.

Capítulo 2

Estado del arte

El capítulo sintetiza definiciones generales sobre robótica móvil y centra su estudio en el proceso de navegación en sistemas autónomos. Analiza la percepción del entorno mediante sensores y las técnicas para la extracción de características del mismo. Describe los sistemas de localización respecto a un punto de referencia (global) y respecto a los obstáculos (local). Plantea el problema de la localización y mapeo simultáneos (SLAM) así como algunos algoritmos que permiten su solución. Por último, detalla algunos métodos de planificación de trayectorias y define el control de movimiento.

2.1. Robótica móvil

Un robot móvil es un sistema que integra percepción del entorno mediante el uso de sensores, una toma de decisiones y un control de acciones. Para ser considerado como tal, un robot móvil debe tener un sistema de locomoción que le permita desplazarse en su entorno. Un esquema de referencia para el funcionamiento de un robot móvil se puede observar en la Figura 9

Existen una gran cantidad de robots con diferentes tipos de locomoción, estos son capaces de andar, saltar, reptar o moverse sobre ruedas; también existen robots aéreos o submarinos cuyo sistema motriz se basa en la generación de un impulso por medio de fluidos. La mayor parte de estos mecanismos de locomoción surge como imitación de los movimientos que se pueden observar en la naturaleza. La principal excepción es la rueda, ampliamente utilizada por sus características.

Dentro de los robots móviles, los robots autónomos son aquellos que no necesitan la intervención humana para mantener el sentido de la orientación y la capacidad de navegación. Los sistemas automáticos se autorregulan pero no son capaces de generar las leyes que deben

tratar de seguir sus reguladores. A diferencia de ellos, los sistemas autónomos han de poder determinar sus estrategias o leyes de conducta y modificar su comportamiento al mismo tiempo que operan en el entorno.

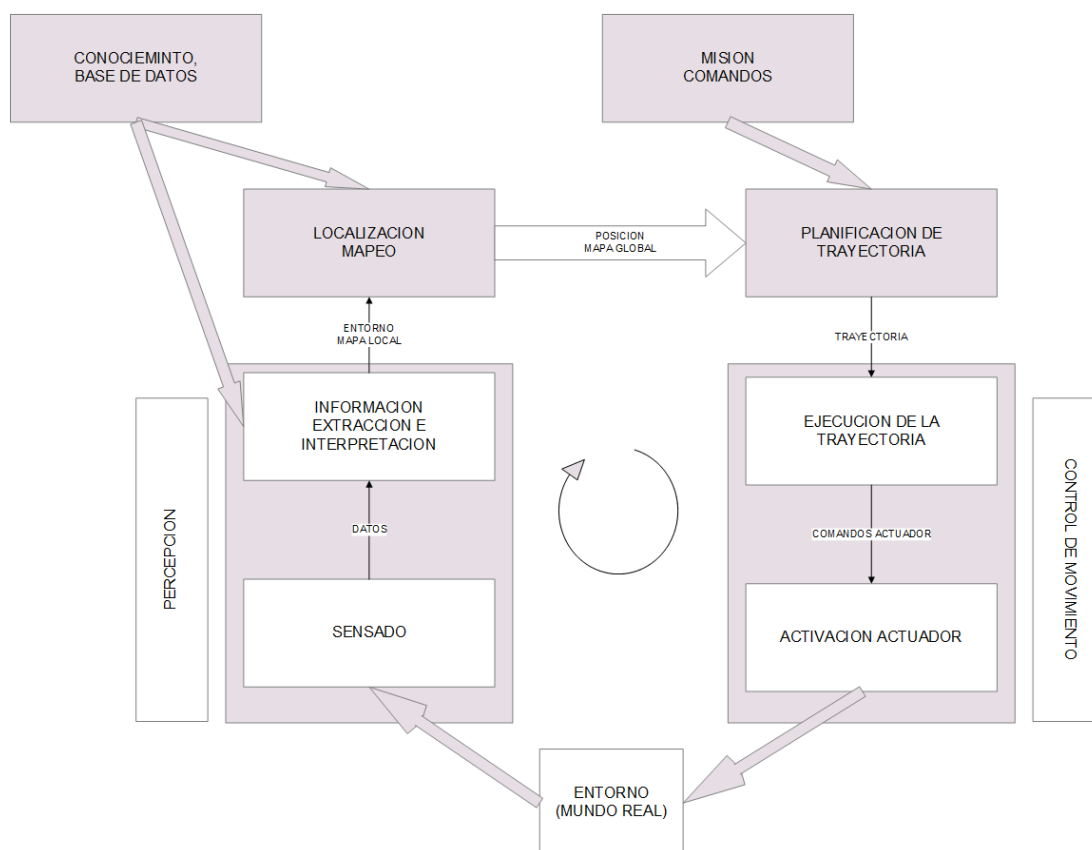


Figura 9: Esquema de referencia para los sistemas de robots móviles.
Basado en: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

2.2. Navegación

2.2.1. Sistemas y métodos de posicionamiento

La localización o el conocimiento de su ubicación actual es una característica importante de un robot móvil autónomo, la plataforma debe conocer alguna información acerca de dónde está y cómo trasladarse a diferentes metas o puntos de interés, debido a esto es imprescindible el uso de sensores o codificadores, visión artificial, visión estereoscópica, láser y sistemas de posicionamiento global.

Los sistemas de posicionamiento a menudo utilizan métodos de triangulación, posición relativa o localización por métodos determinísticos (Monte-Carlo/Markov); a partir del conocimiento de la ubicación se puede planificar una ruta al siguiente punto de referencia u

objetivo. Mediante la obtención de datos por medio de sensores se pueden obtener datos como: tiempo, lugar, distancia o ubicación relativa de ciertas marcas, de manera que puede conocer exactamente cuando y donde se encuentra el robot. Tales robots son a menudo parte de la red inalámbrica de empresa, interconectados con otros sensores y sistemas de control en el edificio. Dando de esta manera una gran variedad de opciones al usuario para su uso.

2.2.2. Navegación en robótica móvil

Se define como navegación en robótica a la habilidad que permite determinar el curso o trayectoria de un robot móvil a través de un entorno desconocido o cambiante. Dentro de la navegación existen diferentes métodos, pero en general la meta final es llevar un robot móvil de un punto a otro de manera eficiente y segura. Un ejemplo de cómo un robot móvil realiza la planificación de trayectoria puede ser observado en la Figura 10.

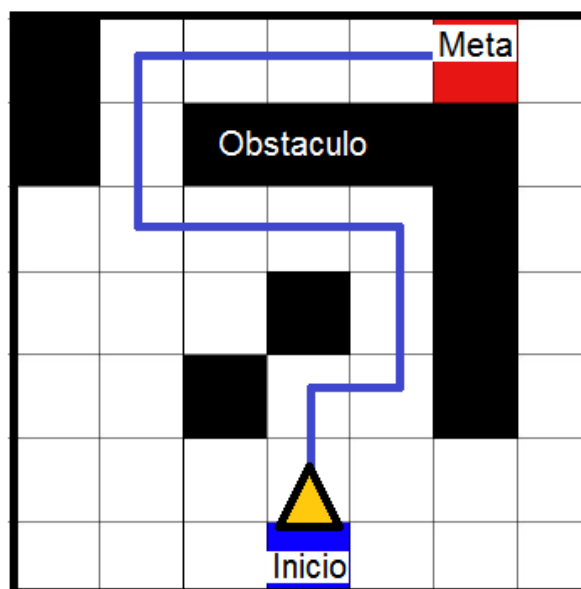


Figura 10: Ejemplo de navegación un Robot Móvil.

Los principales problemas que se busca resolver en la navegación son: la percepción del entorno a través de los sensores, de manera que permita crear una representación abstracta del medio en el que se encuentre; la localización del robot en tiempo real, se debe tener siempre una posición referencia del mismo; la planificación de un trayectoria libre de obstáculos para alcanzar su meta, por donde el robot pueda avanzar; y el control de movimiento que viene dado por el control de los actuadores para conseguir la trayectoria calculada. El proceso se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1:
Proceso de la navegación.

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

Fuente: (Ortiz)

Este proceso se puede llevar a cabo de forma separada, pero tomando en cuenta el orden especificado en él. La interrelación existente entre cada una de estas tareas conforma la estructura de control de navegación básica en un robot móvil. (Shin & Shing, 1990). La misma puede ser observada en la Figura 11.

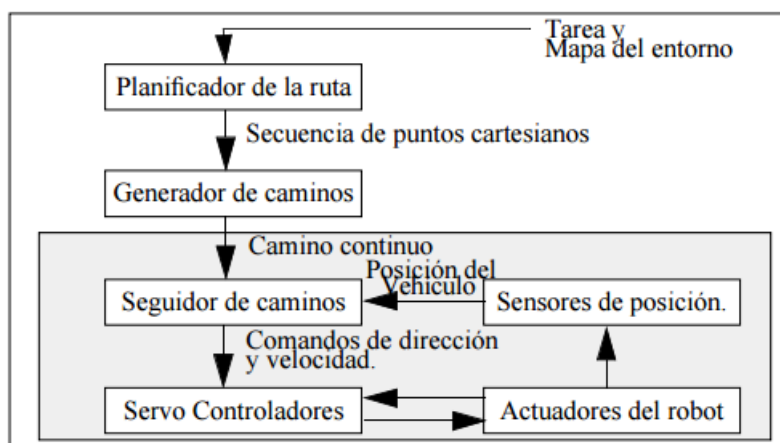


Figura 11: Estructura de control de navegación.

Fuente: (Shin & Shing, 1990)

La prioridad principal de la navegación es la de adaptarse a diversos entornos, siendo estos conocidos o no, para ello hay que hacer una distinción en la explicación de Levi & Loffler (1987) entre la planificación global y local; los mismos conceptos se los explica a continuación:

- **Planificación global:** Construir o planificar la ruta que lleve al robot a cada una de los puntos de control determinadas por la misión, según las especificaciones del problema que debe resolverse. Esta planificación es una aproximación al camino final que se va a seguir, ya que en la realización de esta acción no se consideran los detalles del entorno local al vehículo.

Esta planificación actualmente se realiza por medio de los sistemas de ubicación, los que más destacan tenemos el GPS, GLONASS, entre otros; la planificación global se la realiza antes de que el robot móvil se ponga en marcha.

- **Planificación local:** Resolver las obstrucciones sobre la ruta global en el entorno local al robot para determinar la ruta real que será seguida. El modelo del entorno local se construye mediante la fusión de la información proporcionada por los sensores externos del robot móvil.

Esta planificación se la lleva a cabo mediante sistemas de ubicación locales, los cuales necesitan de la información obtenida de sensores, entre los más usados están SLAM, ODOMETRIA, entre otros; la planificación local se la realiza en tiempo real dentro de la ruta preestablecida por la planificación global.

2.3. Percepción

Una de las tareas más importantes para un sistema autónomo es el adquirir conocimiento suficiente acerca de su entorno, para ello, debe ser capaz de tomar medidas del mismo mediante el uso de varios sensores y a partir de ello discriminar información útil para su navegación.

2.3.1. Sensores

Un robot por definición es una máquina capaz de interactuar con su entorno. Un robot móvil, a menos que se mueva en un espacio absolutamente acotado y preparado para él, deberá adaptar sus movimientos y sus acciones en base a las características físicas del medio en el que se encuentre.

La capacidad de adaptación de un robot móvil dependerá de su nivel de conocimiento del entorno; factores como: localización relativa al lugar, forma del entorno, condiciones físicas, distancia a los obstáculos, entre otros. Para esto se utilizan diversos tipos de sensores, con un rango de complejidad y sofisticación que varía desde algunos bastante simples a otros muy sofisticados tanto a nivel de hardware como de software.

Siegwart & Nourbakhsh (2004) clasifican a los sensores en dos tipos de acuerdo a su funcionalidad dentro de la robótica móvil en:

- Propioceptivos, miden magnitudes internas del sistema (velocidad de los motores, ángulos de las juntas, carga de la batería)
- Exteroceptivos, adquieren información acerca el entorno (distancia, intensidad de luz) que serán interpretados por el robot de manera que pueda extraer las características del medio que necesita conocer

2.3.1.1. Sensor LIDAR

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es un tipo de sensor remoto, exteroceptivo; que funciona mediante la emisión de pulsos de luz láser y la medición precisa del tiempo de retorno del pulso al sensor; a éste tipo de medición se denomina medición por tiempo de vuelo (TOF – time of flight) cuyo principio de funcionamiento se describe en la Figura 12. A partir del tiempo obtenido es posible calcular la distancia que separa al sensor de una superficie; conociendo la posición y orientación del sensor, las coordenadas de la superficie en la que se refleja el láser pueden ser calculadas obteniendo de ésta manera un arreglo de puntos que permiten aproximar un modelo tridimensional a la forma de la superficie.

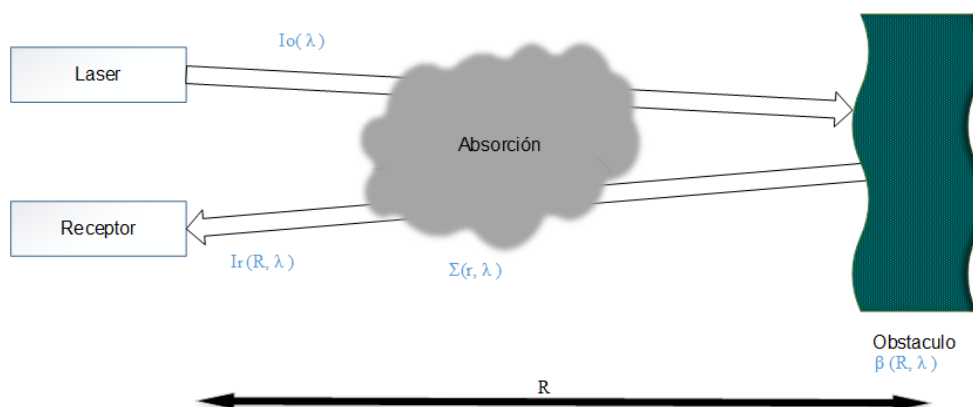


Figura 12: Representación del funcionamiento de un sensor LIDAR.
Fuente: (Liadsky, 2007)

$$I_r(R, \lambda) = I_o n \frac{A}{4\pi R^2} \beta(R, \lambda) \exp\left(-2 \int_0^R \sigma(r, \lambda) dr\right) \quad (2-1)$$

Dónde:

β reflectancia o coeficiente de retro dispersión

σ coeficiente de extinción (absorción, dispersión)

Las principales ventajas de un sensor LIDAR sobre otros tipos de sensor usados para tareas parecidas, radican en que, al ser un sensor activo, la captura de información no depende de variables externas (por ejemplo condiciones meteorológicas, cantidad lumínica, entre otros) permitiendo una flexibilidad, además de una alta velocidad de captura, lo que permite obtener una gran cantidad de datos en intervalos cortos de tiempo, dando al sistema una mayor precisión.

A pesar de ello, también presenta desventajas dependiendo del material de la superficie a ser mapeada debido a su diferencia de reflectancia espectral.

La precisión de un sensor LIDAR en aplicaciones de robótica móvil estarán limitadas a la precisión con la que se conozca la ubicación del sensor, debiendo conocer la posición del sensor para cada pulso de láser emitido, la cual será procesada junto con la orientación del sensor y la distancia medida para poder generar una nube de puntos en tres dimensiones.

Un uso muy extendido, si no el principal, de los sensores LIDAR, es el mapeado y modelado tridimensional de alta resolución con fines topográficos, para ello se utiliza un sistema LIDAR a bordo de un avión de ala fija (para mediciones menos precisas pero más amplias) o helicóptero; a menor velocidad, se obtiene una mayor densidad de puntos y por tanto, una mayor precisión. Además es necesario un sistema de medidas inerciales (IMU) que indica el estado de la posición angular (pitch, roll, yaw) del sensor respecto al suelo o un sistema de referencia y también hacer uso del sistema de posicionamiento global (GPS) de modo que se pueda conocer la ubicación de la plataforma aérea, para lograr la precisión necesaria es importante ubicar una estación GPS de referencia en tierra. Un esquema representativo de un mapeado aéreo con LIDAR se observa en la Figura 13.

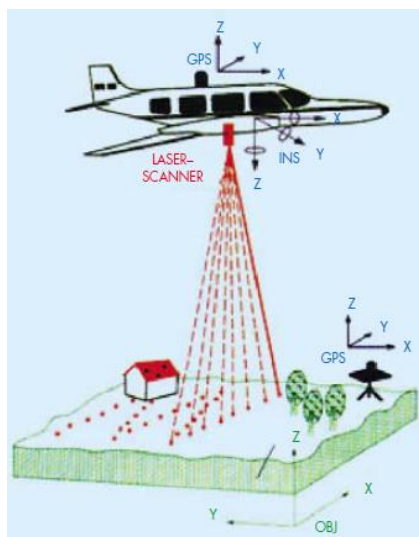


Figura 13: Esquema de vuelo para mapeado con LIDAR y sistemas coordenados de cada componente.

Fuente: (Magdaleno Mas & Martínez Romero, 2006)

En la robótica móvil, sensores LIDAR se usan frecuentemente para realizar mapping debido a su alta precisión y resolución angular. La Figura 14 representa un set de puntos obtenidos por un sensor LIDAR de 360° sobre un robot móvil y su visualización en 2D.

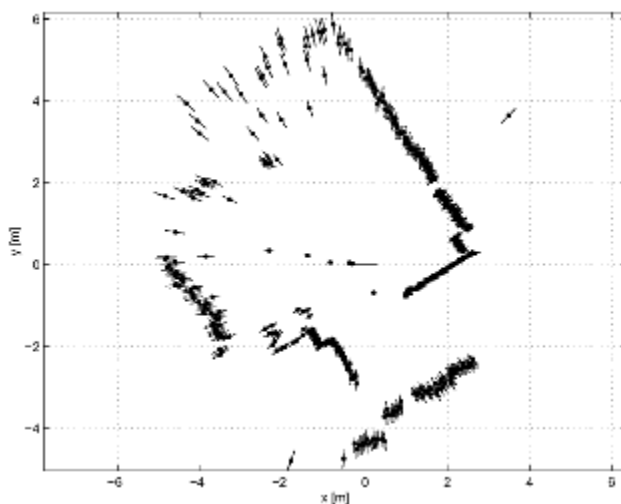


Figura 14: Imagen típica de un mapping realizado con un sensor láser en 2D, las líneas sobre los puntos medidos indican la incertidumbre.

Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

A partir de los datos obtenidos por los sensores, es posible extraer la información del entorno que el robot necesita, para ello, se debe analizar la nube de datos obtenida y aplicar ciertas estrategias para la detección y extracción de características.

2.3.1.2. Sónar

Sónar es un sensor usado en robótica y algunas aplicaciones de automatización industrial que funciona tanto como emisor y como receptor de ultrasonidos, se basa en el principio de navegación de los murciélagos. El sensor genera pulsos acústicos los cuales golpean contra obstáculos y rebotan produciendo ecos que retornan al mismo para medir la distancia que existe; puesto que la velocidad del sonido es conocida, la distancia al objeto es proporcional al tiempo de viaje de su eco. La Figura 15 muestra el principio de funcionamiento de un sónar.

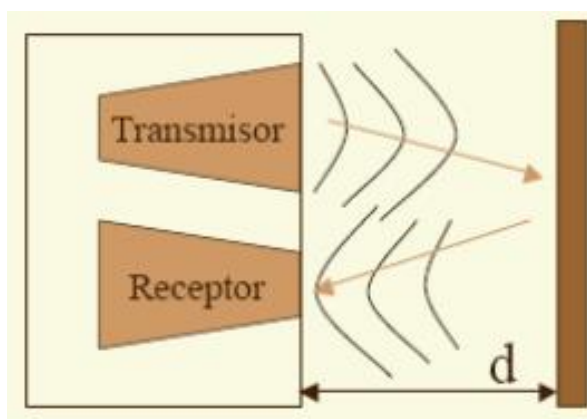


Figura 15: Principio de funcionamiento de un sónar

Se debe tener en cuenta que aplicar este tipo de tecnologías en robots móviles depende en gran medida de la aplicación a realizarse puesto que posee un rango de alcance pequeño y una tendencia a especular con la señal de retorno, esto lo convierte en un elemento poco confiable si está trabajando fuera de los límites de distancia y de ángulo.

En la robótica móvil el uso de estos sensores tiene sus desventajas como: reflexión múltiple, la onda de sonido puede rebotar en varios objetos antes de volver al receptor; interferencias, cuando otro sónar envía una onda idéntica en el rango de acción del sensor pueden producirse errores de lectura; mala resolución angular; entre otros.

Para reducir errores a causa de estos problemas se ha considerado distribuir sensores ultrasónicos (como también es conocido un sónar) en un anillo como el mostrado en la Figura 16.

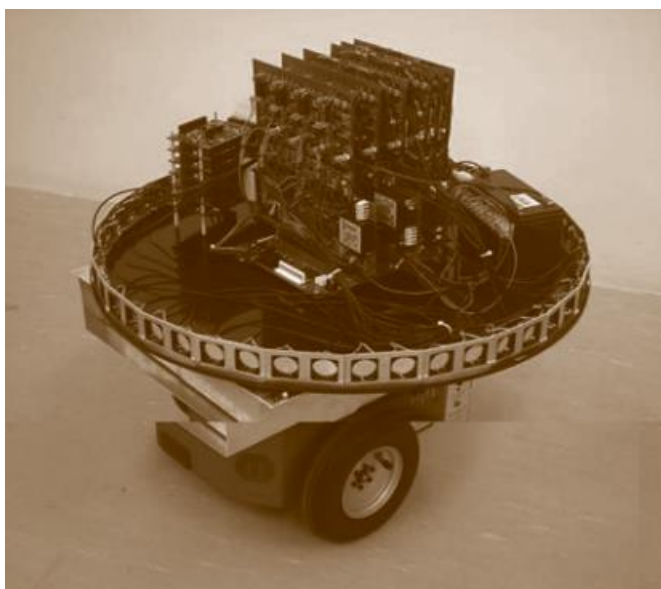


Figura 16: Disposición sonar en forma de anillo.
Fuente: (Peremans, Audenaert, & Van Campenhout, 1993)

2.3.2. Extracción de características

La interacción de un robot con su entorno, por consiguiente su navegabilidad, depende de la información que pueda obtener del mismo, el problema radica en que los datos proporcionados por los sensores, siempre tienen algún error e incertidumbre asociados, Se debe hallar la forma de poder usar los sensores para una interacción completa y precisa con el medio, a pesar de la incertidumbre. Existen dos estrategias.

La primera estrategia a utilizar, y también la más sencilla, es usar las medidas de cada sensor como un grupo de datos individuales y conectarlos directamente al comportamiento del robot, haciendo al robot dependiente únicamente de sus sensores; de manera alternativa, es posible usar los datos para formar un modelo intermedio donde ciertos comportamientos del robot se cumplen al activarse ciertos sensores.

La segunda estrategia, descrita en la Figura 17, permite extraer información de uno o más sensores y generar a partir de ella un nivel de percepción de más alto nivel, que permita informar al modelo del robot los comportamientos a seguir; esta estrategia es denominada extracción de características y no necesariamente es usada para controlar todas las actividades del robot.

La extracción de características es útil por ejemplo al evitar obstáculos, ya que permite, a través de los datos obtenidos, modelar una malla de ocupación del espacio, permitiendo al robot planear una ruta más precisa y eficiente por la cual transitar. En el caso de construcción

de mapas y navegación precisa, los valores obtenidos de los sensores son la fuente de información perceptiva a partir de la cual se pueden extraer características para realizar una interpretación de la escena minimizando así la incertidumbre generada por el sensor y haciendo más robusto al sistema de navegación.



Figura 17: Percepción, desde el entorno hacia la interpretación de la escena

Las características a extraer son estructuras reconocibles de elementos en el entorno que pueden ser descritas de forma matemática, un rasgo importante a cumplir es que siempre una característica debe ser fácilmente detectable; es posible distinguir entre características de bajo nivel (geométricas) como líneas, círculos, polígonos y de alto nivel (objetos) como esquinas, puertas, mesas.

Para elegir las características a extraer es importante tener en cuenta varios factores:

- Entorno objetivo. Para que las características extraídas sean útiles, deben existir en el entorno. Por ejemplo, las líneas son útiles en ambientes cerrados como oficinas debido a la existencia de paredes, pero son inútiles al navegar espacios abiertos.
- Sensores disponibles. Los sensores específicos del robot, así como el umbral de incertidumbre de cada uno, generan un gran impacto en la extracción de características, un sensor con mejores prestaciones siempre dará mejores resultados a la hora de extraer información.
- Coste computacional. Sistemas basados en visión artificial, tendrán un alto coste computacional, por consiguiente, el procesador del robot será una limitación al uso de este tipo de sistema.
- Representación del entorno. La información que provee la extracción de características es importante para la interpretación del entorno, por ello, debe ser consonante con el mismo. Por ejemplo, un sistema de visión puede no ser el indicado en entornos puramente geométricos (una extracción de líneas puede funcionar mejor), pero su rendimiento será mucho mejor en entornos con topologías más variadas.

Una vez elegidas las características a extraer, se procede a la elección del algoritmo mediante el cual se procesará los datos para la extracción; existe una gran cantidad de algoritmos o formas de afrontar el problema, a continuación se explica una solución a partir de la extracción de líneas rectas que puede ser desarrollada para la extracción de otras figuras.

2.3.2.1. Extracción de líneas

La extracción de características geométricas usualmente se basa en la comparación de los datos del sensor con plantillas o modelos predefinidos de la forma que se espera obtener; usualmente, el sistema recibe del sensor una cantidad de datos mayor a la que necesita para realizar la comparación. El error que presentan los datos del sensor no permite una solución consistente, convirtiendo a la extracción en un problema de optimización, para ello es necesario el uso de aproximaciones probabilísticas

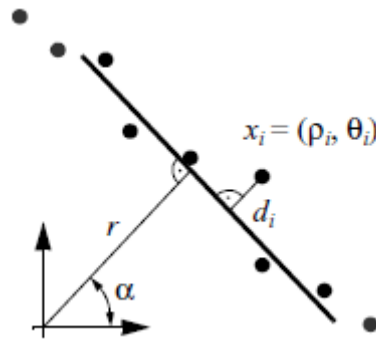


Figura 18: Estimando una línea a partir de los datos de un sensor.
Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

En la Figura 18, a partir de un conjunto de datos en coordenadas polares: $x_i = (\rho_i, \theta_i)$, obtenidos de un sensor, se pretende extraer una línea. Siegwart & Nourbakhsh (2004) muestran como optimizar los datos medidos y obtener la ecuación de la línea teniendo en cuenta la incertidumbre propia del sensor. Obteniendo:

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum w_i \rho_i^2 \sin 2\theta_i - \frac{2}{\sum w_i} \sum \sum w_i w_j \rho_i \rho_j \cos \theta_i \sin \theta_j}{\sum w_i \rho_i^2 \cos 2\theta_i - \frac{1}{\sum w_i} \sum \sum w_i w_j \rho_i \rho_j \cos(\theta_i + \theta_j)} \right) \quad (2-2)$$

$$r = \frac{\sum w_i \rho_i \cos(\theta_i - \alpha)}{\sum w_i} \quad (2-3)$$

Siendo r la magnitud de la perpendicular y α su ángulo con la abscisa.

Otra forma de optimizar los datos y obtener líneas rectas es el método RANSAC (RANdom Sampling Consensus), consenso en un muestreo aleatorio; un método iterativo usado en estadística para extraer datos anómalos o que difieren de la distribución normal de la población, en este caso, valores fuera de la línea que se busca hallar.

RANSAC elige al azar una muestra de lecturas y utiliza análisis numérico para hallar una función que se ajuste a la distribución de puntos (línea). *“Esta técnica se conoce con el nombre de mínimos cuadrados, ya que pretende minimizar el cuadrado del error producido al restar la posición de la estimación con respecto a los puntos estimados. Al elevar el error al cuadrado obtenemos un conjunto de valores que siempre serán positivos, mientras que se otorga un mayor peso a los errores más grandes y un menor peso a los errores más pequeños.”* (Viñals Pons , Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect, Universidad politecnica de Valencia, 2012)

Luego de la estimación, el método RANSAC comprueba si una cantidad suficiente de lecturas están cerca a la aproximación realizada, dicha cantidad es un consenso y al sobrepasarlo se puede estar seguro de estar frente a una línea recta. Un ejemplo de filtrado de puntos por método RANSAC se expone en la Figura 19.

En general, los datos obtenidos en cualquier entorno no representan una única línea, lo que hace que deba segmentarse los datos para obtener varias líneas.

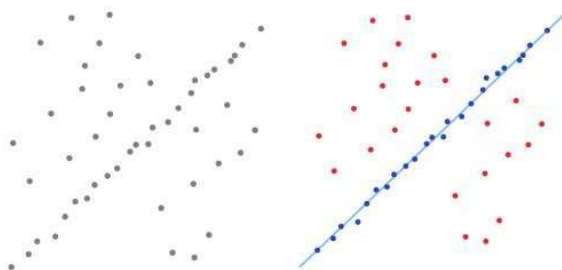


Figura 19: Filtrado de datos y extracción de línea por RANSAC.

Fuente: (Viñals Pons, Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect., 2012)

2.3.2.2. Segmentación en la extracción de líneas

El set de medidas provenientes del robot debe ser dividido en subgrupos para ser analizados e interpretados uno a uno en búsqueda de características a extraer. Existen varias técnicas para la segmentación de puntos, por ejemplo, las técnicas de fusión (*merging*) o de

abajo hacia arriba (*bottom-up*) donde las características más pequeñas son identificadas y fusionadas teniendo en cuenta ciertos criterios.

Por ejemplo, teniendo un set de datos al cual se ha aplicado la extracción de líneas, se obtienen varias ecuaciones que definen a la cantidad de segmentos de línea encontrados; La fusión consiste en encontrar segmentos de línea que tienen altas probabilidades de pertenecer a una misma línea. Teniendo las ecuaciones de dos líneas: $x_1 = [\alpha_1, r_1]$ y $x_2 = [\alpha_2, r_2]$, se busca hallar su cercanía, utilizando la ecuación de la distancia Euclídea:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_{k-1}) \quad (2-4)$$

La distancia hallada debe ser menor a un valor umbral d_m .

2.3.2.3. Combinación de características

Las características halladas deben ser combinadas para poder seguir completando el mapa, para ello, se usa histogramas, el algoritmo mide el ángulo entre dos características adyacentes y luego de compensar el ruido devuelve un histograma. El proceso se ilustra en la Figura 20 Este algoritmo puede ser usado también para hallar aberturas en las paredes, como puertas, ventanas, etc.

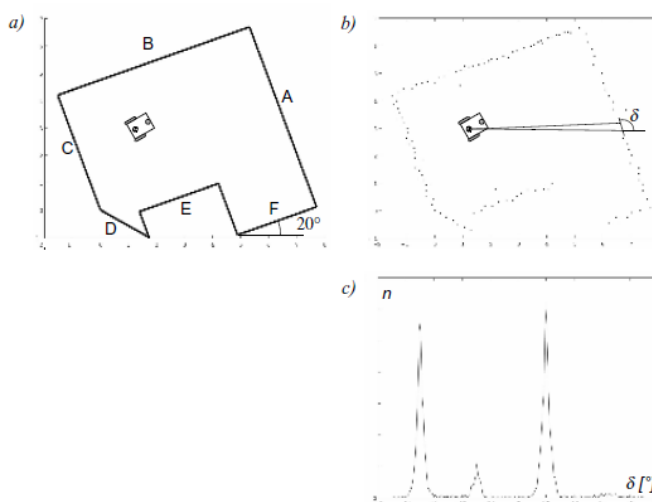


Figura 20: Combinación de características mediante histogramas.

Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

2.3.2.4. Extracción de otras geometrías

Al salir de un entorno hecho por el hombre donde las paredes dan como resultado líneas rectas en la medición el robot necesita reconocer otras formas, para ello, el procedimiento es parecido al de la extracción de líneas, la diferencia está en que el set de optimización y

comparación no será una línea recta, si no, se debe proveer al sistema un variado set de características dependientes del entorno en que el robot se vaya a desenvolver.

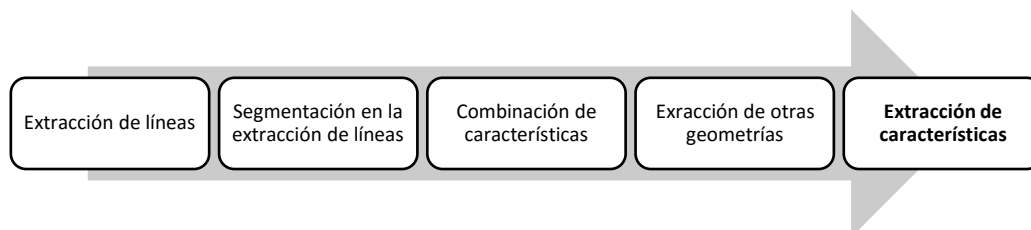


Figura 21 : Proceso de la extracción de características

La Figura 21 muestra una representación completa del proceso de extracción de características detallado anteriormente.

2.4. Localización

El robot debe saber su ubicación en el entorno en todo momento para poder decidir las acciones a tomar sobre el mismo, la localización es entonces, el componente más importante dentro de la navegación.

Si fuera posible añadir a un robot, un sensor capaz de determinar la ubicación del mismo con altísima precisión en cualquier lugar del mundo, es lógico pensar que muchos de los problemas de la robótica móvil estarían solucionados, lamentablemente esto no es tan cierto. Existe un sistema que permite al robot conocer su ubicación en cualquier parte del mundo, pero desafortunadamente, su precisión no es tan alta como se desearía; el sistema de posicionamiento global (GPS), alcanza generalmente precisiones de algunos metros, simplemente inaceptable para robots de escala humana o menor, sin contar con que la tecnología GPS es incapaz de funcionar en interiores.

Además, muy aparte de las limitaciones del GPS, la localización implica más que el conocimiento de la posición del robot en el planeta. La capacidad de interacción del robot con el entorno exige que el mismo sea capaz de saber qué lo rodea.

Es igualmente importante entonces, saber la ubicación del robot respecto a un punto de referencia global (localización absoluta) y saber su ubicación respecto al entorno que lo rodea (localización relativa).

2.5. Localización Global

(Siegwart & Nourbakhsh, 2004) Define a la localización global o absoluta como el conocimiento de la ubicación del robot respecto a un punto fijo de referencia. La posición puede ser calculada a partir de sistemas de posicionamiento global (latitud y longitud) o a partir del conocimiento de la ubicación inicial del robot y su cinemática.

2.5.1. GPS

GPS (Global Positioning System), es un sistema de posicionamiento global basado en satélites artificiales desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a principios de los años 70; inicialmente fue desarrollado con fines exclusivamente militares, mas, su excesivo coste hizo que se permita el uso del sistema para la sociedad civil, con el objetivo de que fuera aprobado el presupuesto por el Congreso de los EE.UU. (aproximadamente 10.000 millones de dólares). El Sistema se denominó NAVSTAR/GPS (Navigation System Using Timing and Ranging / Global Positioning System).

Las características principales del sistema GPS son:

- Determinación de la posición tridimensional en tres coordenadas: latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar.
- Determinación tridimensional de la velocidad.
- Determinación del tiempo exacto (error de un microsegundo)
- Cobertura fiable las 24 horas del día
- No depende de transmisores terrestres
- Precisión independiente de condiciones atmosféricas

El permitir el uso civil del sistema GPS conllevaría riesgos a la seguridad nacional, por lo tanto se decidió dividir el servicio en dos tipos:

- SPS (Standard Positioning Service)
- PPS (Precise Positioning Service)

Según Reuter (2001) PPS permite una fiabilidad y precisión 10 veces mayor a SPS, para ello, el servicio SPS transmite datos erróneos de manera premeditada permitiendo una precisión de 100 metros un 90% del tiempo; precisión suficiente para navegación pero no para direccionamiento de armas y lamentablemente para otras aplicaciones entre las que destacan:

- Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems), que incluyen sistemas anti-colisión y de mantenimiento de carril en vía.
- Agricultura de precisión, incluyendo mapeo del terreno, aplicación de fertilizantes, pesticidas, semillas o plantas a un área determinada y control de maquinaria.
- Control automático de vehículos robóticos
- Cálculos de trayectorias de referencia.

Debido a ello, la comunidad científica ha tenido que investigar métodos que permitan a sistemas de índole civil trabajar con precisiones de decímetros o incluso centímetros en algunos casos, por ejemplo, (Carcanague, 2013) plantea el desarrollo de un Algoritmo para posicionamiento preciso utilizando sistemas GPS/GLONASS, obteniendo como resultado precisiones menores a 70 centímetros en ambientes semi-urbanos y alrededor de 1 – 3 metros en el área urbana; es importante recalcar que los sistemas desarrollados se basan únicamente en configuración y algoritmos para el receptor.

Existen actualmente al menos 24 satélites operando de forma continua divididos en seis órbitas inclinadas 55 grados respecto al plano de la línea ecuatorial, con cuatro satélites cada una, completan una órbita cada 12 horas a una altura de 20.190 km. Cada satélite transmite de forma continua cada 30 segundos exactos su localización y tiempo, además de un código propio que lo distingue; todos los satélites están sincronizados de manera que las señales son enviadas al mismo tiempo; el receptor, es capaz entonces, de determinar su distancia respecto a cada satélite de acuerdo a la diferencia en el tiempo de llegada de los datos. Al combinar el conocimiento de la distancia y la localización instantánea de al menos cuatro satélites, el receptor puede calcular su posición mediante triangulación; dicho proceso es representado en la Figura 22.

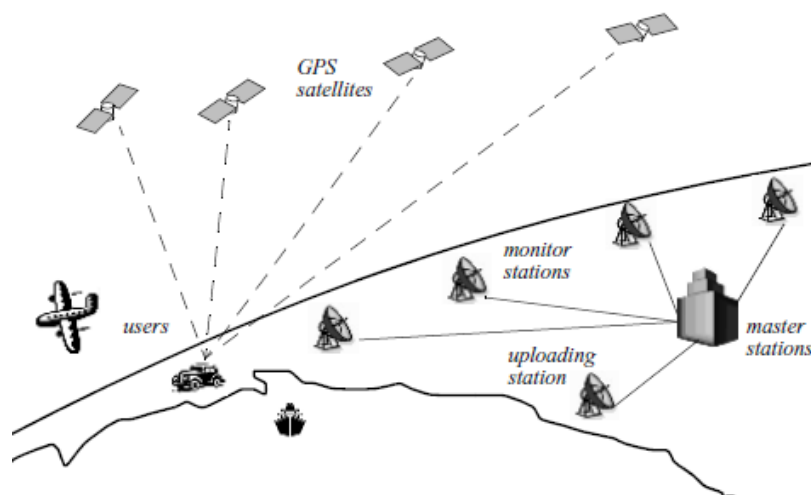


Figura 22: Cálculo de la posición basado en GPS.
Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

2.5.2. Odometría

La odometría se define como el estudio de la estimación de la posición de vehículos con ruedas durante su navegación. En robots móviles se utiliza para estimar (y no determinar) su posición relativa a su localización inicial. La odometría entrega información precisa a corto plazo, no obstante, como es la integración de información incremental del movimiento a lo largo del tiempo, este inevitablemente acumula errores. Dando como resultado un método eficiente para posicionamiento en cortas distancias al punto de referencia inicial.

La odometría se basa en el uso de sensores propioceptivos los cuales proporcionan información sobre el estado interno del robot, un ejemplo los encoders posicionados en los ejes de las ruedas, para que mediante el uso de ecuaciones sencillas se logre traducir las revoluciones de las ruedas a un desplazamiento lineal relativo al suelo. Este concepto básico puede proporcionar datos erróneos cuando el robot móvil bajo alguna circunstancia patine, se sobre acelere o cuando sea movido por alguna fuerza externa fuera de su posición (errores no sistemáticos); también depende directamente de la exactitud de la localización y orientación inicial del robot. Según este enfoque, cada posición calculada por el robot está rodeada por una elipse de error característica, la cual indica la región de incertidumbre, mediante más tiempo transcurre mayor será la incertidumbre.

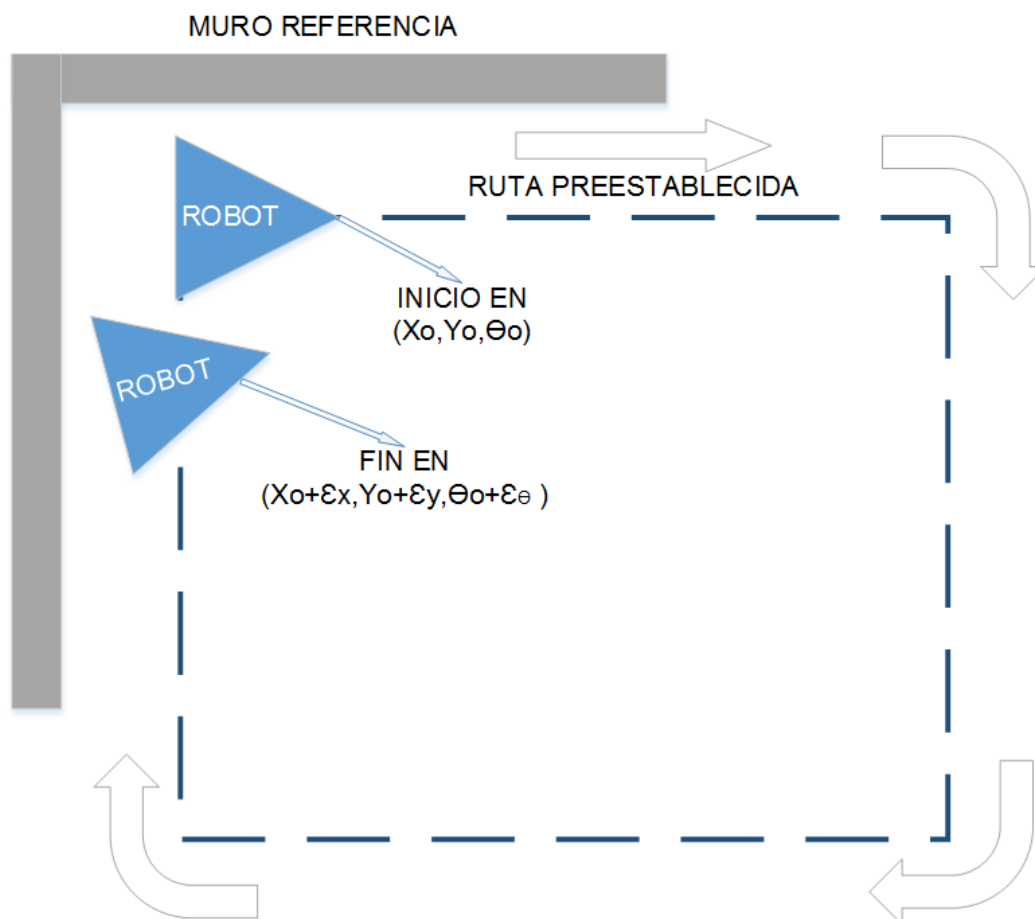


Figura 23: Incertidumbre en la Odometría

En la Figura 23 se puede observar con mayor claridad a lo que se refiere el error por incertidumbre, dada una trayectoria preestablecida de un cuadrado, el robot inicia en un punto de referencia y al terminar llega a un punto diferente, en este caso la incertidumbre es representada como los errores sumados en cada coordenada.

2.6. Localización Local

Según (Siegwart & Nourbakhsh, 2004), la localización local (relativa) es la ubicación del robot respecto al entorno que lo rodea. Para el cálculo de su posición el robot hace uso de sensores que le permiten construir un mapa del medio en el que se encuentra a medida que transita por el mismo; o de marcas existentes en un mapa conocido.

2.6.1. Mapeo del entorno

El mapeo representa la información obtenida del entorno por medio de los sensores, de manera que esta información sea utilizada para la localización y planificación de la trayectoria.

Para esto existen dos enfoques diferentes: topológico y métrico. (Viñals Pons, Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect., 2012)

- Representación topológica, esta únicamente considera los lugares y las conexiones entre ellos. Estos mapas tienen forma de grafos o puntos en el espacio, donde cada nodo representa una distinta posición y las aristas, como las conexiones entre los nodos. Es posible almacenar las distancias entre posiciones como peso de las aristas que las unen.
- Representación geométrica, esta considera los objetos dentro del espacio bidimensional en el que se producirá el desplazamiento. Las coordenadas de los objetos son elegidas con precisión. Ésta es la representación preferida al resolver el problema del SLAM.

La generación de mapas por celdillas de ocupación se basa en discretizar el espacio, dividiéndolo en unidades de tamaño predefinido, que se clasifican como ocupadas o vacías con un determinado nivel de confianza o probabilidad.

Estas soluciones parten del supuesto de que la posición del robot es conocida. Debido a que es una ubicación basada en probabilidades se necesita de algún método de localización que estime la posición del robot en cada momento. La precisión de estos mapas se basa en el tamaño del muestreo de las celdillas, siendo así, mientras más pequeñas las celdillas mayor la probabilidad de que la posición del robot sea correcta.

Una vez estimada la posición del robot y elegida la representación del mapa, podemos elegir la estrategia para elegir el camino más eficiente que el robot deberá seguir a través del entorno. Se conoce a este problema como planificación de trayectoria.

2.6.2. Localización por marcas

Este es un método de localización basado en puntos de referencia situados o ubicados estratégicamente en el entorno por el cual el robot móvil se desplazará. Para esto el robot debe tener sensores capaces de distinguir dichas marcas; de esta manera el robot podrá saber la ubicación en la que se encuentra.

Los “*landmark*” o puntos de referencia son características del entorno que puedes ser fácilmente diferenciadas y re-observadas, estas marcas deben cumplir con una serie de requisitos para considerarlas como un buen punto de referencia (Riisgaard & Rufus Blas). Un robot móvil con sistema de localización por marcas y la forma de las mismas se muestra en la Figura 24.

- Debe ser observable desde diferentes posiciones y ángulos.
- Debe ser lo suficientemente única como para poder ser distinguido de otras características, es decir si uno observa dos características y las re-observa en el futuro, debe poder identificar cual es cual.
- Deben ser suficientes como para que el robot no circule un largo trayecto sin observar ningún landmark, caso contrario el robot podría perderse.
- Deben permanecer estacionarios, una referencia en movimiento provocaría datos y estimaciones erróneas.

Este método no es muy eficiente puesto que solo depende de marcas, dicho de otra manera si el robot por algún motivo no logra visualizar o reconocer una marca este se perdería.

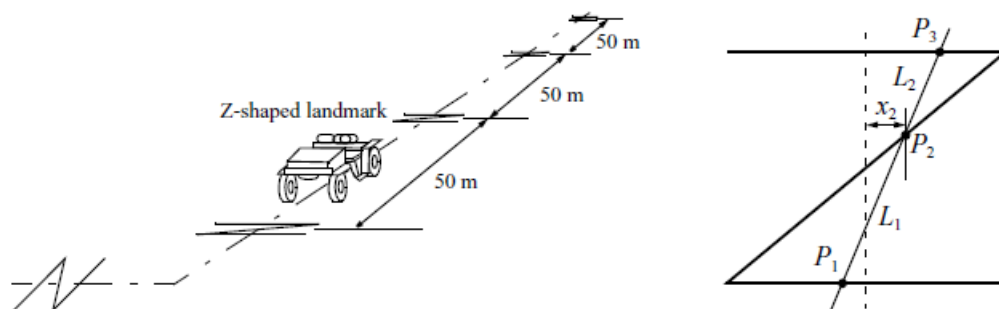


Figura 24: Localización por marcas en forma de Z.

2.6.3. Localización SLAM

SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), sistema de localización y mapeado simultáneo, es un sistema desarrollado y usado para facilitar la navegación de un robot móvil a través de un entorno desconocido, este sistema es uno de los avances más notables dentro de la comunidad de especialistas en robots móviles puesto que permite a cualquier robot tener las herramientas necesarias para ser autónomo.

El sistema SLAM permite al robot móvil crear un mapa consistente de manera incremental a medida que avanza por el mismo; también hace posible conocer la ubicación del robot dentro del mapa en todo momento, información necesaria para que el sistema de navegación del robot.

Para la resolución del problema SLAM existen algunos algoritmos para, de los cuales se citan tres de los más utilizados a continuación:

El primero, conocido como Filtro Extendido de Kalman (EKF) es el primero históricamente, pero su uso ha disminuido debido a sus propiedades computacionales limitantes. El segundo, basado en representaciones gráficas, aplica el método de optimización no lineal para resolver el problema de SLAM, y se ha convertido en el algoritmo más usado para la resolución del problema de SLAM completo. Por último, el método que usa técnicas de filtrado estadístico no paramétrico, conocidas como filtros de partículas es un método muy usado para hacer SLAM online y aporta una nueva solución al problema de la asociación de datos en SLAM.

Filtro extendido de Kalman

El filtro de Kalman para resolución del SLAM trata de estimar el estado x perteneciente a los reales positivos de un proceso discreto en el tiempo, que está definida por una ecuación no-lineal del tipo:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k, w_{k-1}) \quad (2-4)$$

Dónde: f es la función definida por nuestro modelo del sistema

x_k Representa el estado del proceso

u_k Las variables de entrada

w_k El ruido debido a la estimación

Además, el modelo tiene una ecuación de medidas z :

$$z_k = h(x_k, u_k) \quad (2-5)$$

Dónde: h es la función representativa de los sensores

El filtro de Kalman estima un proceso usando un método realimentando de control: se estima el estado del proceso en un momento determinado y después se obtiene una realimentación en forma de medida. Las ecuaciones para el filtro se dividen en dos grupos principales:

- Ecuaciones de predicción, son las responsables de proyectar el estado actual y la covarianza estimada para obtener una estimación a priori para el siguiente escalón temporal.

$$\hat{x}_{\bar{k}} = f(\hat{x}_{k-1}, u_k, 0) \quad (2-6)$$

$$P_{\bar{k}} = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \quad (2-7)$$

- Ecuaciones de corrección, son las responsables de la realimentación del sistema, incorporando nuevos datos a la estimación a priori para conseguir una mejora en la estimación a posteriori.

$$K_k = P_{\bar{k}} H_k^T (H_k P_{\bar{k}} H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \quad (2-8)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k (z_k - h(\hat{x}_{\bar{k}}, 0)) \quad (2-9)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{\bar{k}} \quad (2-10)$$

Dónde:

- $\hat{x}_{\bar{k}}$ y \hat{x}_k son, respectivamente, los estados del sistema estimado a priori (predicción) y a posteriori (corrección).
- A es la matriz Jacobina de derivadas parciales de f respecto al estado x .
- W es la matriz Jacobina de derivadas parciales de f respecto al ruido del sistema w .
- H es la matriz Jacobina de derivadas parciales de h respecto al estado x .
- Q es la matriz covarianzas del proceso que define el ruido w .
- R es la matriz covarianzas de la medida que define el ruido v .
- Las matrices P y P^- representan las covarianzas del error estimado a posteriori y a priori, respectivamente.

- La matriz K es la matriz de ganancia del filtro que minimiza la covarianza del error a posteriori.

2.7. Planificación de trayectoria

Una vez que el robot conoce su ubicación, es capaz de planificar una trayectoria a seguir, el primer paso es convertir el entorno real en un entorno discreto que el robot es capaz de interpretar. Para ello existen tres estrategias principales.

2.7.1. Muestreo o mapa de vías.

Conecta las posibles vías que puede seguir el robot desde su posición inicial hasta su meta generando un mapa a partir de pequeños caminos interconectados; se basa en la geometría de los obstáculos. Toma muestras de N diferentes configuraciones o caminos y los proyecta hacia la solución de problema, de todos los caminos, elige aquellos que permanezcan dentro de las restricciones (colisión con obstáculos) y toma esos puntos como marcas.

Traza un camino entre dos marcas teniendo en cuenta siempre que esté libre de obstáculos, a medida que traza caminos entre marcas, eventualmente logrará unir el punto de salida con la meta.

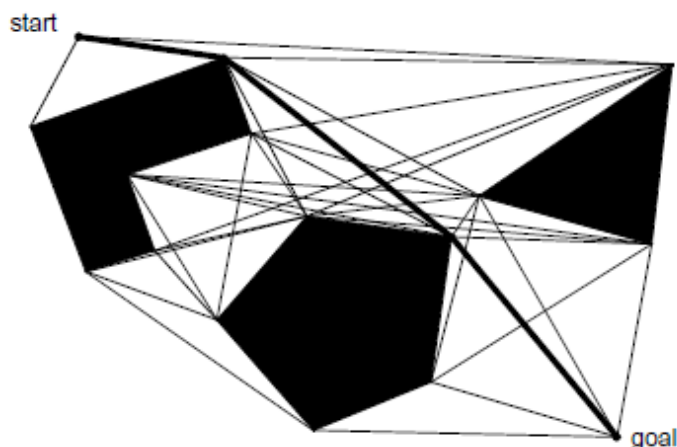


Figura 25: Trazado del camino. Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

En la Figura 25, se observa como los vértices de los obstáculos funcionan como marcas, cada nodo conecta al siguiente definiendo los caminos y finalmente, luego de un muestreo se determina la ruta a seguir.

2.7.2. Trayectoria basada en celdillas

Como su nombre lo indica es la resolución de una trayectoria en función de celdillas, estos algoritmos discretizan el espacio en el que el robot puede moverse en una matriz de celdillas, todas las celdillas deben ser del mismo tamaño y en función de eso también se define la resolución, siendo que, mientras más pequeña la celdilla mayor precisión. Cada celdilla representa un posible estado en este caso la posición del robot móvil. Se recomienda no realizar celdillas de un tamaño mayor al de robot puesto que por la geometría podría llegar a chocar con los obstáculos.

Un algoritmo básico de descomposición puede sintetizarse así:

- Dividir el mapa en regiones simples y conectadas (células)
- Determinar qué células abiertas son adyacentes y construir un gráfico de conectividad
- Buscar las células donde están la posición inicial y la meta y buscar un camino por el que se pueda unir ambas.

El robot puede desplazarse a cualquier celdilla adyacente, siempre y cuando la celdilla represente un estado alcanzable refiriendo a un espacio vacío, por ende un obstáculo representa un estado no alcanzable como se representa en la Figura 26.

De esta manera las únicas acciones que puede tomar el robot se reducen y es posible utilizar algoritmos de búsqueda, como los algoritmos A*, para encontrar la solución, estos algoritmos son muy efectivos siempre y cuando el grafo o mapeado este correctamente realizado. Ciertos algoritmos ofrecen la posibilidad de realizar movimientos en cualquier ángulo, encontrando así caminos más cortos.

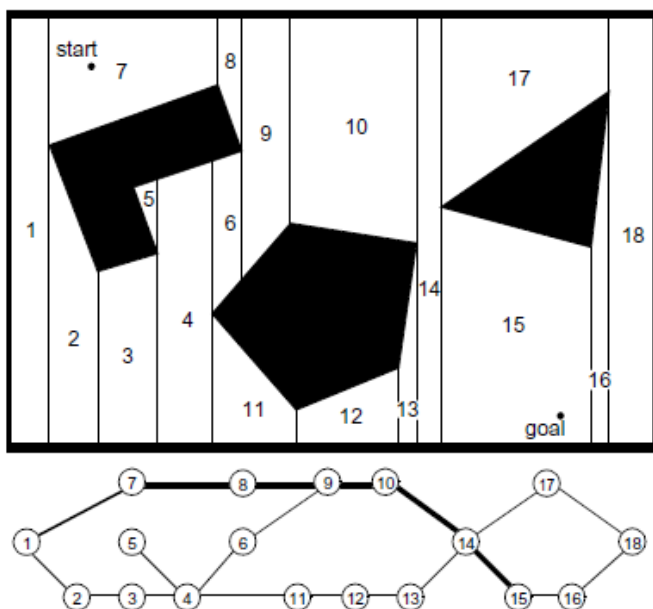


Figura 26: Descomposición en celdas y camino óptimo.
Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

Los algoritmos de búsqueda por celdillas necesitan realizar repetidas búsquedas en los casos en que el entorno se actualice con el tiempo, o cuando el conocimiento del robot sobre el entorno cambia con la exploración como es en el caso de SLAM.

Búsqueda primero en anchura

Se visita e inspecciona cada nodo para, a partir de él visitar a todos los nodos vecinos y a partir de ellos, a sus correspondientes vecinos. Siempre devuelve el camino óptimo pero, el tiempo que tarda en encontrar la solución dependerá de la cantidad de nodos. Un diagrama básico es representado en la Figura 27.

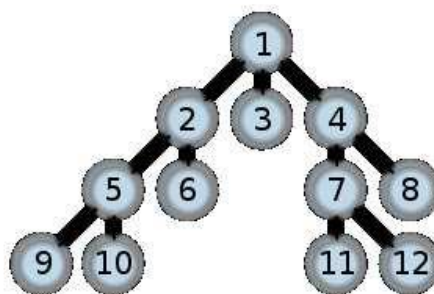


Figura 27: Despliegue de los nodos para la búsqueda primero en anchura.

Fuente: (Viñals Pons, Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect., 2012)

Búsqueda primero en profundidad

Visita al primer nodo “hijo” del nodo en que se encuentra, si el camino no lleva a ninguna solución, regresa hasta el anterior nodo con “hijos” y repite dicha operación hasta encontrar un nodo “hoja” (sin hijos). Tal como se muestra en la Figura 28. El camino que encuentra no siempre es el óptimo, pero permite determinar rápidamente si el nodo meta es alcanzable y encuentra el primer camino.

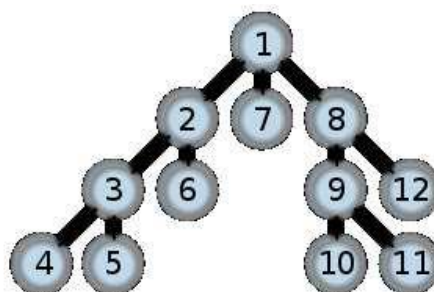


Figura 28: Despliegue de los nodos para la búsqueda primero en profundidad.

Fuente: (Viñals Pons, Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect., 2012)

2.7.3. Campo potencial

Creación de un campo o gradiente con el mapa conocido alrededor del robot; para la planificación de la trayectoria, guía al robot hacia la meta tratándolo como un punto bajo la influencia de un campo potencial artificial. El robot se mueve siguiendo el campo mientras la meta actúa como una fuerza de atracción y los obstáculos como picos o fuerzas de repulsión.

La utilidad de la estrategia, mostrada en la Figura 29; radica en que a medida que avanza el robot puede ir encontrando más obstáculos, y será capaz de esquivarlos ya que actuarán como fuerzas de repulsión, manteniendo siempre la mira en la meta que “atrae” al robot.

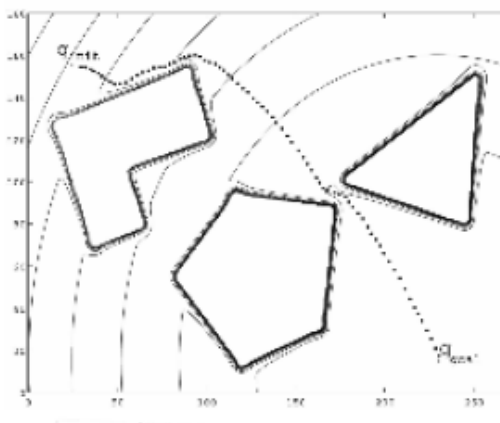


Figura 29: Camino trazado mediante la estrategia de campo potencial. Fuente: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

2.8. Control de movimiento

Una vez que el robot conoce su localización y ha planeado una trayectoria, debe aplicar acciones de control sobre sus actuadores que le permitan ejecutar la ruta; para ello se debe tener en cuenta la cinemática del robot, así como el tipo de actuadores.

Técnicas de control tales como PID, Fuzzy (lógica difusa), Inteligencia Artificial e incluso Redes Neuronales; permiten tener un control sofisticado sobre la velocidad y dirección de los actuadores y por consiguiente del comportamiento del robot. El control de movimiento del robot hace parecer que la trayectoria del mismo está siendo directamente controlada, a pesar de que las acciones de control se aplican únicamente a los mecanismos que permiten el movimiento del mismo.

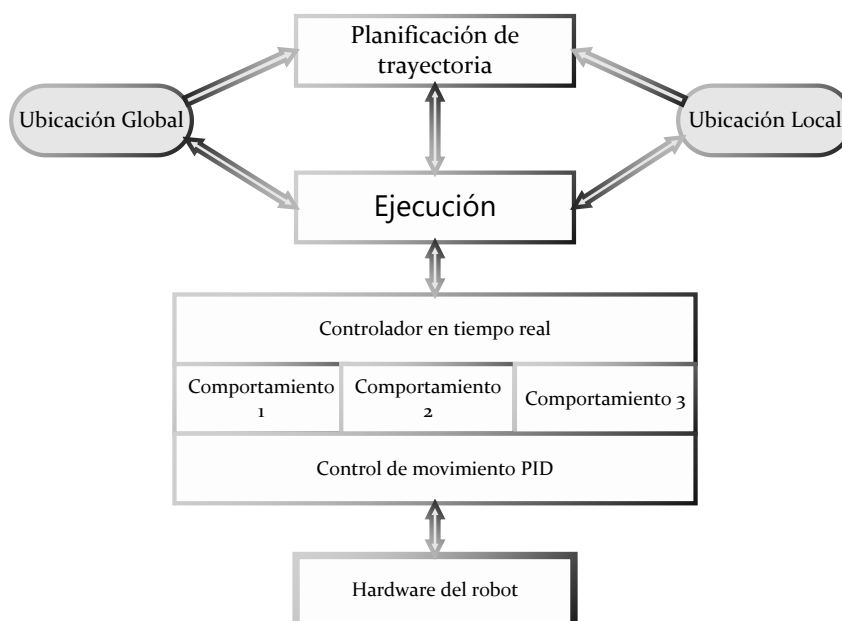


Figura 30: Arquitectura de control de un robot. Basado en: (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

En la Figura 30 se detalla la arquitectura de control de un robot, es importante notar que el sistema de control actúa sobre el hardware del robot; teniendo en cuenta el conocimiento del mapa, la trayectoria y la localización del autómata, distintos comportamientos previamente programados permiten ejecutar los movimientos.

2.9. Resumen

- Un robot móvil autónomo es capaz de tomar decisiones y controlar sus acciones mediante estrategias de selección de trayectoria, como la búsqueda basada en celdillas, primero en anchura, primero en profundidad o basada en campo potencial; modificando su comportamiento al mismo tiempo que opera en el entorno.
- Un sistema de navegación permite determinar la trayectoria de un robot móvil a través de un entorno desconocido, teniendo en cuenta: la percepción, localización, planificación y control de movimiento.
- Para extraer características del medio y poder construir un mapa, la percepción se basa en el uso de sensores como codificadores, visión artificial, visión estereoscópica y láser.
- La localización del robot se mide en dos formas: global respecto a un punto de referencia (localización absoluta) y; local respecto al entorno que lo rodea (localización relativa). La localización por marcas y el SLAM son técnicas que permiten determinar la localización del robot.
- La conversión de un entorno real a entorno discreto, sirve para que el robot lo pueda interpretar y de esta forma conociendo su ubicación pueda trazar una trayectoria a seguir.
- Luego de definir la trayectoria que debe seguir, el robot procede a aplicar acciones de control sobre sus actuadores, de esta forma se puede ejecutar la ruta.

Capítulo 3

Metodología y diseño

El capítulo muestra la metodología utilizada para el diseño del sistema de ubicación. Se basa en el modelo para diseño y desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2012) a fin de lograr un diseño eficientemente enfocado a la solución de problemas. Define el concepto del producto; sus necesidades y características técnicas. Estructura el concepto de acuerdo a su función en el diseño y plantea alternativas que luego son evaluadas. Selecciona opciones preliminares de diseño a nivel sistema y finalmente especifica el diseño de detalle para cada módulo.

3.1. Definición del concepto

Según (Ulrich & Eppinger, 2012), para el desarrollo de un producto se debe elaborar el concepto y sus estatutos de manera general. Se capta el sentir del cliente, se analizan las necesidades y se documentan. Se identifica las especificaciones técnicas más relevantes para la calidad y se realiza un análisis de la importancia de los mismos.

3.1.1. Definición de las necesidades

Las necesidades definen las características y prestaciones que el concepto requiere para el diseño final; permiten desarrollar especificaciones técnicas del producto. El título del presente trabajo expone de forma general ciertas necesidades. Sin embargo, existen aspectos adicionales que deben ser considerados a fin de realizar un diseño óptimo.

Tabla 2: Requerimientos o necesidades del consumidor

N°	REQUERIMIENTOS
1	No debe ingresar agua al interior del robot móvil
2	Debe subir al menos una grada
3	Video en tiempo real
4	Debe trasladarse a un punto indicado por sí solo
5	No debe chocar
6	No debe perderse
7	Control remoto
8	Software de control de uso libre

Los conceptos detallados en la Tabla 2 se analizarán por separado y se generarán posibles soluciones para la elaboración del proyecto. El fin de la mencionada tabla es aclarar los puntos a los cuales se centrará el diseño de la plataforma robótica móvil con el fin de brindar una solución práctica, sencilla y modular.

3.1.2. Definición de las características técnicas

Para el desarrollo de este punto se parte de los requerimientos para la plataforma robótica móvil, se define las características técnicas, que son las necesidades del usuario traducidas a lenguaje técnico. De manera que, una vez se obtenga las especificaciones necesarias, se pueda elaborar el proyecto de una forma más clara y objetiva.

En la Tabla 3 se encuentra de manera detallada las características técnicas necesarias para logra satisfacer las necesidades del usuario.

Tabla 3: Características técnicas

N°	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
1	Estructura sellada e impermeable
2	Diámetros de ruedas y distancia entre ejes acorde a las dimensiones del robot móvil
3	Transmisor de video en tiempo real
4	Sistema de navegación robusto
5	Sensor de ubicación local
6	Sensor de ubicación global
7	Alcance de tele operación
8	Software de programación robótica de acceso libre

3.1.3. QFD

La Función de Desarrollo de la Calidad (Quality Function Deployment), mejor conocida como casa de la calidad; relaciona los requerimientos de los clientes con las características técnicas necesarias para satisfacerlos. Tomados en su conjunto, los requerimientos definen la calidad de un producto y son las expresiones que los clientes utilizan para describir los productos y sus características deseables. Métricas asociadas a las características técnicas son usadas para determinar el grado de satisfacción de los clientes con sus requerimientos. Esta medida es fundamental para la mejora continua (Yacuzzi & Martín, 2003).

QFD permite develar la importancia de cada aspecto técnico en la solución del problema final de una forma ordenada, sistemática y eficaz. Logrando una mayor satisfacción del cliente

al tiempo que reduce los tiempos y costos involucrados en el diseño de un producto. La matriz QFD realizada se muestra en la Figura 31.

Interacciones →

Características Técnicas									
		<p>Necesidades o requerimientos</p>							
Importancia para el cliente		↑							↓
Estructura sellada e impermeable									
Diámetros de ruedas y distancia de ejes acordes									
Transmisor de video robusto									
Sistema de navegación robusto									
Sensor de ubicación local									
Sensor de ubicación global									
Alcance de tele operación									
Software de programación de acceso libre									
No debe ingresar agua al interior del robot móvil	1	9	9	1	3	1	1	1	1
Debe subir al menos una grada	2	3	9	1	1	3	1	1	1
Vídeo en tiempo real	2	1	1	9	3	1	1	9	3
Debe trasladarse a un punto indicado por si solo	3	1	3	1	9	9	9	9	9
No debe chocar	3	1	1	3	9	9	3	3	1
No debe perderse	3	1	1	3	9	9	9	3	1
Control remoto	2	1	1	9	9	3	3	9	3
Software de control de uso libre	1	1	1	9	9	9	9	9	9
Importancia Técnica		26	44	60	92	78	74	84	54
Ponderación	%	5.078	8.594	11.72	17.97	15.23	14.45	16.41	10.55

Figura 31: Casa de la calidad para el sistema de ubicación

Finalmente, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4, ordenando su ponderación de mayor a menor; obteniendo:

Tabla 4: Resultados de la matriz QFD

HITOS	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	PORCENTAJE DE PONDERACIÓN
1	Sistema de navegación robusto	17,97
2	Alcance de tele operación	16,41
3	Sensor de ubicación local	15,23
4	Sensor de ubicación global	14,45
5	Transmisor de video en tiempo real	11,72
6	Software de programación robótica de acceso libre	10,55
7	Diámetros de ruedas y distancia entre ejes acordes a las dimensiones del robot móvil	8,59
8	Estructura sellada e impermeable	5,08

3.2. Factibilidad y planeación

3.2.1. Estructura funcional

Un punto importante dentro de la factibilidad es el análisis de las características técnicas por medio de mediciones funcionales de especificación y desempeño del concepto, en síntesis es determinar la forma de trabajo que este debe tener. Al obtener los resultados de la matriz QFD, se los debe englobar en módulos y formar una estructura funcional. Esto permite desglosar la operatividad del mismo y trabajar en módulos.

Los módulos permiten distribuir de mejor manera las diversas operaciones funcionales dando un orden para cubrir las necesidades de una forma óptima. Para el desarrollo de la plataforma robótica móvil se define la estructura modular mostrada en la Tabla 5

Tabla 5: Módulos para diseño

#	MÓDULO	SUBSISTEMAS	FUNCIONES	HITOS A CUMPLIR
1	Ubicación	Ubicación global	Geolocalización del robot	1;4
		Ubicación local	Conocimiento del entorno	1;3
2	Monitoreo	Cámara a bordo	Video en tiempo real	5;6
		Interfaz	Comunicación humano - máquina	
3	Estructura	Ruedas	Capacidades todoterreno	7;8
		Cubierta	Impermeabilizar	
4	Adquisición y mando	N/A	Control en bajo nivel	1;3;4;5;6
			Adquisición de datos	
5	Comunicación	N/A	Envío y recepción de señales	1;2;5;6

El proceso de diseño de (Ulrich & Eppinger, 2012), presenta dos etapas adicionales:

- Diseño Preliminar
 - Enumeración de las alternativas para diseño
 - Evaluación de alternativas y selección del diseño
- Diseño final

El diseño final se ha dividido en tres partes principales para el presente trabajo

- Diseño mecánico
- Diseño electrónico
- Sistema de control

3.3. Módulo 1. Ubicación

3.3.1. Subsistema 1. Ubicación Global

El subsistema de ubicación global es el encargado de entregar los datos necesarios para determinar la ubicación del robot respecto a un punto fijo de referencia.

3.3.1.1. Alternativas para diseño

Para este subsistema existen al menos dos soluciones que son: a) Sistema de posicionamiento global (GPS) y b) Odometría.

Sistema de posicionamiento global (GPS)

El sistema de posicionamiento global permite hallar la ubicación del robot en cualquier parte del planeta, entregando coordenadas de latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar.

Ventajas

- Permite saber la ubicación en todo el planeta.
- La posición no se ve afectada por cambios de altura.
- Fácil instalación.

Desventajas

- Alto costo.
- La precisión de un GPS de uso civil es menor a la de uso militar.
- La precisión del módulo depende directamente del costo.
- Trabaja únicamente a cielo abierto.

Odometría

Es un sistema basado en el cálculo de la distancia recorrida por la plataforma desde el punto de inicio del movimiento (fijo), la posición se determina a partir de las mediciones realizadas sobre los actuadores que permiten el movimiento del robot. Estas mediciones son realizadas por medio de sensores de tipo encoder.

Ventajas

- Bajo costo.
- Uso relativamente sencillo.
- Entrega posición y orientación del robot.

Desventajas

- Difícil implementación.
- La precisión se ve afectada por fuerzas externas.
- Eficiente para posicionamiento en cortas distancias.


3.3.1.2. Evaluación y selección de alternativas

Luego de un análisis exhaustivo se concluye que el sistema más eficiente para la implementación en la plataforma es el GPS. Debido principalmente a tres factores:

- Al ser una plataforma para exteriores las distancias recorridas son grandes y pueden existir notables diferencias de altura, debido a esto el error producido por la odometría será mayor causando dificultades en la navegación.
- Al tener el robot construido previamente se dificulta el acople de los encoder a los ejes para realizar la odometría, mientras que al GPS se lo puede ubicar en cualquier parte de la plataforma.
- El sistema de posicionamiento global es robusto, probado, mundialmente aceptado y por medio del software se puede hacer un estimado de la odometría.

Las alternativas más destacadas para GPS se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6:
Alternativas para el sensor GPS (Ubicación Global)

	SOLUCIÓN	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
A	RasPiGNSS		COSTO*: \$173,00 Tarjeta de expansión únicamente para Raspberry Pi Conexión 26 pines Compatibilidad GPS, GLONASS, GALILEO
B	EM-506		COSTO*: \$39,95 Receptor de 48 canales Alta sensibilidad: -163dBm Inicio rápido (1s) Precisión de 2,5m
C	BU-353		COSTO*: \$33,00 Conexión USB Tiempo de inicio: 15 s Precisión de 10 m Sensibilidad: -159dBm

* Costo estimado en tiendas únicamente dentro de USA

La siguiente etapa en el diseño es realizar una ponderación de criterios para optimizar la selección; la Tabla 7 presenta dicha ponderación teniendo un valor mayor el criterio más importante a tomar en cuenta para la selección. Luego se evalúa cada solución teniendo en cuenta cada uno de los criterios presentados y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas, se obtiene una solución.

Tabla 7:
Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1, subsistema 1

Criterio	Costos	Precisión	Implementación	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Pond.
Costos	-	0	5	0	6	0,18
Precisión	5	-	5	2,5	13,5	0,40
Implementación	0	0	-	5	6	0,18
Disponibilidad	5	2,5	0	-	8,5	0,25
				Σ	34	1,00

Tabla 8:
Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1

Costos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 9:
Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 10:
Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,19
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,19
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Σ	18	

Tabla 11:
Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 1

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	2,5	3,5	0,19
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	2,5	0	-	3,5	0,19
			Σ	18	

Tabla 12:
Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 1, subsistema 1

	Costos	Precisión	Implementación	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,0098	0,1324	0,0343	0,0486	0,23	23%
Solución B	0,0833	0,2426	0,0343	0,1528	0,51	51%
Solución C	0,0833	0,0221	0,1078	0,0486	0,26	26%
				Σ	1,00	

El sensor elegido es el EM-506 (Solución B) cuyas principales características se detallan a continuación:

- Chipset GPS SiRF Star IV de alto rendimiento
- Muy alta sensibilidad (-163 dBm)
- Soporta interfaz de comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
- Antena cerámica integrada
- Tamaño compacto (30.0mm x 30.0 mm x 10.7 mm)
- Soporte para protocolos NMEA 0183 V3.0 (GGA, GSA, GSV, RMC, VTG, GLL, ZDA)
- Tiempo de establecimiento menor a 35 segundos en arranque en frío y menor a un segundo para arranque en caliente.
- Precisión de posición horizontal: 2,5 metros o menos.
- Precisión de la velocidad: 0,01 m/s (lineal) y 0,01° (orientación)
- Tasa de actualización: 1 segundo

Descripción de pines

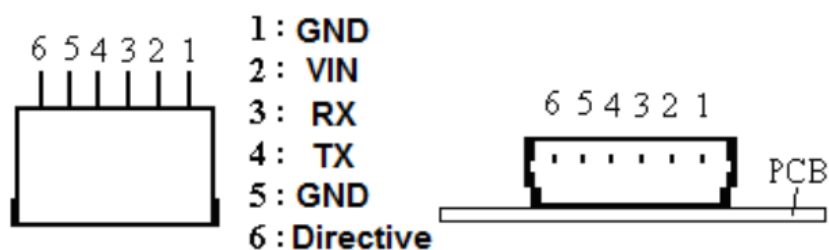


Figura 32: Pines del sensor GPS EM-506.
Fuente: (Globalsat Technology Corporation, 2013)

Tabla 13:
Descripción de pines del sensor EM-506

PIN	Denominación	Tipo	Descripción
1, 5	GND	Alimentación	Tierra (0 V)
2	VIN	Alimentación	Fuente de poder (4.5Vdc a 6.5Vdc)
3	RXD	Entrada	Canal de entrada para la recepción de comandos de software.
4	TXD	Salida	Canal para la transmisión de los datos de navegación y medida (Nivel lógico 3,3V)
6	Directive	Salida	Indicador del estado del GPS

De acuerdo a la Tabla 13 la conexión entre el sensor y la placa de desarrollo Raspberry a usar como controlador de la plataforma debe ser realizada como se detalla en la Figura 33

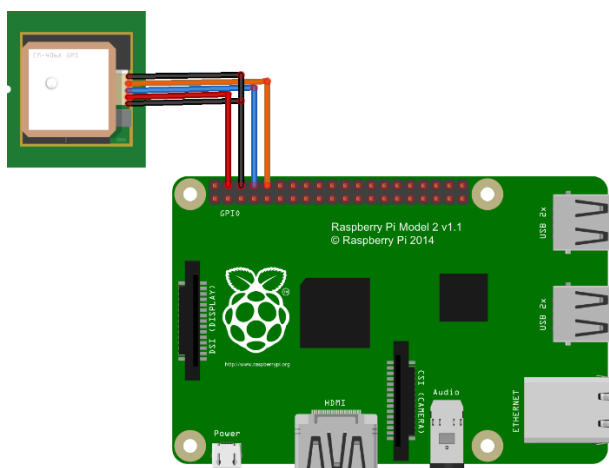


Figura 33: Esquema de conexión entre el sensor EM-506 y la placa Raspberry

3.3.2. Subsistema 2. Ubicación local

El subsistema de ubicación local se encarga de hallar la posición específica del robot respecto al entorno en que se desarrolla, logrando de ésta manera evitar obstáculos. Para ello, es necesario el uso de sensores, a partir de cuyos datos se puede realizar un mapeo del entorno.

3.3.2.1. Alternativas para diseño

Sensor LIDAR

LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) es una tecnología basada en la emisión y recepción de un haz de láser, por medio de este se puede medir la distancia a un objeto o superficie. La medición se basa en el tiempo que se tarda en regresar el haz del láser.

Ventajas

- Mediciones exactas.
- Respuesta inmediata.
- Amplio rango de trabajo.

Desventajas

- Alto costo.
- Mediciones inexactas con objetos transparentes.

Sensor Sónar

SÓNAR (Sound Navigation And Ranging) tecnología que usa la propagación del sonido para navegar, comunicarse o detectar objetos, se lo utiliza como medio de localización acústica, funcionando de forma similar al LIDAR, con la diferencia de que en lugar de emitir un haz de laser emplea pulsos sonoros.

Ventajas

- Bajo costo.
- Las mediciones no depende del material.

Desventajas

- Precisión media
- Mediciones propensas a ruido.
- Respuesta relativamente lenta.

- Alcance medio.




3.3.2.2. Evaluación y selección de alternativas

La elección más lógica en cuanto las características necesarias es el sensor LIDAR. Parámetros determinantes para dicha elección son:

- Al ser un robot para exteriores es necesario un sensor que tenga un buen alcance dado que el área por la cual navegara es extensa.
- El bajo tiempo de respuesta del LIDAR permite realizar una mayor cantidad de medidas en el mismo tiempo lo que generará un mejor mapeo y por tanto mejores condiciones para la navegación.
- El LIDAR a diferencia del sónar no se ve afectado por perturbaciones o ruido del ambiente, haciéndolo ideal para la aplicación de la plataforma para exteriores.

Las alternativas más destacadas para LIDAR son enumeradas en la Tabla 14.

Tabla 14:
Alternativas para el sensor LIDAR (Ubicación local)

SOLUCIÓN	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
A RPLidar		COSTO*: \$398,90 2000 puntos por segundo Rango 0-6 metros Resolución 0,5 mm (1% de distancia) Rango de medida bidimensional
B LIDAR-Lite V2		COSTO*: \$114,95 Rango 0-40 metros 500 puntos por segundo Precisión $\pm 2,5$ cm Conexión I2C o PWM Rango de medida unidimensional
C Velodyne PUCK		COSTO*:\$7999 Rango 0-100 metros 300000 puntos por segundo Diseño resistente a factores externos Precisión ± 2 cm Interfaz propia del fabricante Rango de medida bidimensional

* Costo estimado en tiendas únicamente dentro de USA

Tabla 15:
Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1, subsistema 2

Criterio	Costos	Precisión	Implementación	Impermeabilidad	$\Sigma+1$	Pond.
Costos	-	2,5	5	5	13,5	0,40
Precisión	2,5	-	2,5	2,5	8,5	0,25
Implementación	0	2,5	-	2,5	6	0,18
Impermeabilidad	0	2,5	2,5	-	6	0,18
				Σ	34	1,00

Tabla 16:
Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2

Costos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 17:
Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	2,5	6	0,33
Solución B	2,5	-	2,5	6	0,33
Solución C	2,5	2,5	-	6	0,33
			Σ	18	

Tabla 18:
Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,47
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	2,5	5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 19:
Ponderación de impermeabilidad para las alternativas de diseño al módulo 1, subsistema 2

Impermeabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,19
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,19
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Σ	18	

Tabla 20:
Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 1, subsistema 2

	Costos	Precisión	Implementación	Impermeabilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,1324	0,0833	0,0833	0,0343	0,33	33%
Solución B	0,2426	0,0833	0,0098	0,0343	0,37	37%
Solución C	0,0221	0,0833	0,0833	0,1078	0,30	30%
				Σ	1,00	

El sensor a usar para la ubicación local de la plataforma es un LIDAR-Lite V2 cuyas características principales fueron expuestas en la Tabla 14.

Descripción de pines



Figura 34: Pines del sensor LIDAR-Lite. Fuente: (PULSED LIGHT LLC, 2014)

Tabla 21:
Descripción de pines del sensor LIDAR-Lite

PIN	Denominación	Tipo	Descripción
1	POWER-IN	Alimentación	Fuente de Poder (4,75 – 5,5V DC)
2	POWER-EN	Entrada	Habilita el funcionamiento del microcontrolador de 3,3V
3	MODE	Salida	Salida PWM
4	SCL	Comunicación	Señal de reloj I2C
5	SDA	Comunicación	Señal de datos I2C
6	GND	Alimentación	Tierra (0 V)

3.3.3. Diseño Final

3.3.3.1. Diseño mecánico

Para lograr que la plataforma se ubique respecto a su entorno, es necesario realizar un mapeo del mismo, esto se logra mediante un mapeo de la zona; para lo cual es necesario que el sensor entregue un conjunto de puntos en un rango de medida bidimensional (al menos). Como se ha visto hasta ahora, el sensor en cuestión únicamente es capaz de entregar medidas en un rango unidimensional; debido a dicha limitación, se necesita diseñar y construir un sistema que dote al sensor de movimiento para así obtener datos en dos dimensiones. La Figura 35 ilustra de una mejor manera el principio de funcionamiento.

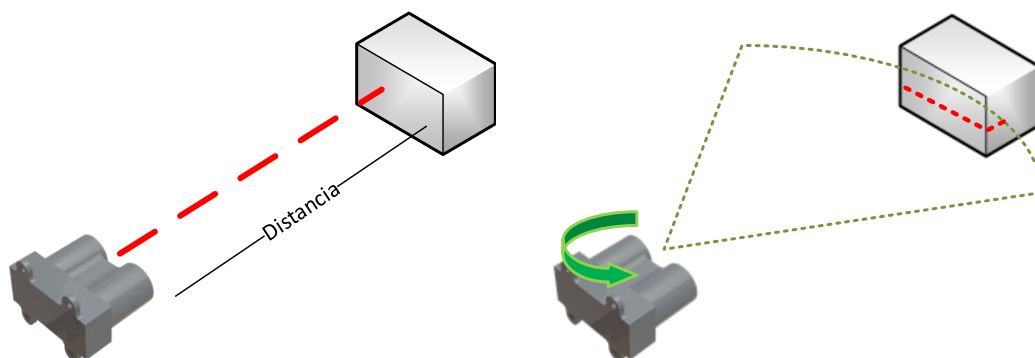


Figura 35: Esquema de funcionamiento del sensor LIDAR

Dando así al sistema una apreciación del entorno en dos dimensiones, con una clara idea de la forma de los obstáculos a su alrededor y de la distancia.

El sistema diseñado permite la rotación del sensor sobre su propio eje; gracias a la utilización de un motor paso a paso como el mostrado en la Figura 36, se evita el uso de un encoder para determinar la posición angular del sensor a medida que toma los datos.

Características del motor paso a paso

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



Figura 36: Motor paso a paso NEMA 17

El motor estará girando a una velocidad de 60 rpm, es decir, completará una revolución cada segundo; en éste tiempo, el sensor deberá emitir la señal de 200 puntos, siendo cada punto equivalente a un paso del motor. Así, se asegura que el sensor no pierde medidas a medida que gira, y el sensor tiene una resolución de $1,8^\circ$.

El uso de un anillo colector (slip-ring), que se puede observar en la Figura 37, hace posible el giro en 360 grados del sensor, logrando así un mapa completo que permite una mejor ubicación de la plataforma respecto a su entorno.



Figura 37: Anillo colector.

Fuente: <https://www.sparkfun.com/products/13065>

Es necesario comprobar el dimensionamiento del motor para lo cual se calcula el esfuerzo generado por el momento de rozamiento del rodamiento usado, el mismo que por diseño soporta el peso del sensor, soporte engranaje y carcasa, ello se puede ver en la Figura 38.

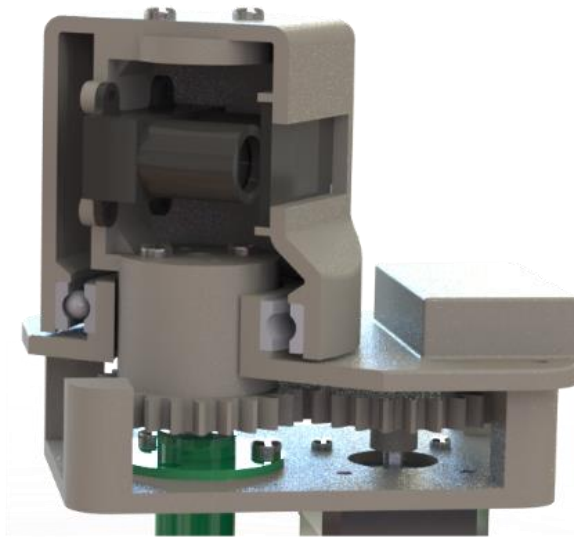


Figura 38: Corte transversal del sensor. Obsérvese como el rodamiento mantiene los elementos mientras soporta el peso de los mismos

Se procede a calcular el momento de rozamiento en función de la velocidad de giro, para:

$$v * n \geq 2000 \quad (3-1)$$

Donde:

v → *Viscosidad cinemática del lubricante a la temperatura de funcionamiento.*

n → *Velocidad de funcionamiento.*

Para el cálculo de la viscosidad se recurre al diagrama mostrado en la Figura 39; Estimación de la viscosidad cinemática mínima a la temperatura de funcionamiento de la empresa SKF.

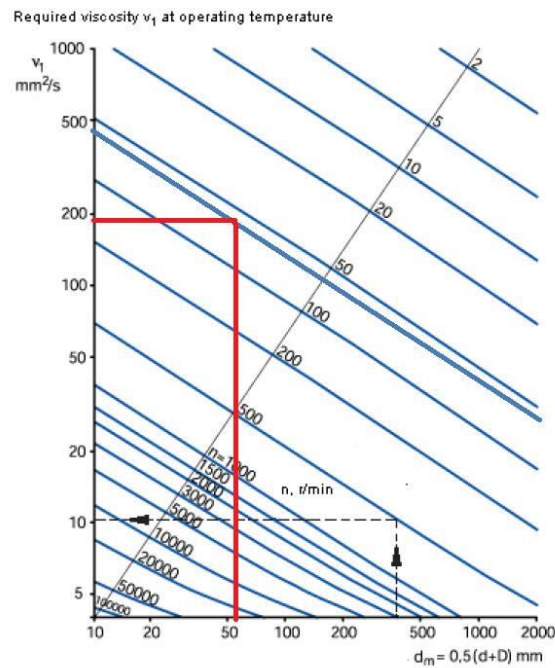


Figura 39: Diagrama de Estimación de la viscosidad cinemática
Fuente:(SKF Group, 2016)

Como dato se tiene que $n \rightarrow 60 \frac{rev}{min}$.

Y del diagrama se obtiene en función del diámetro medio del rodamiento y la velocidad del trabajo, que $v \rightarrow 200$.

Entonces se tiene de la ecuación (3-1):

$$v * n = 12000 \quad (3-2)$$

Dado que $v * n \geq 2000$, la ecuación a usar es la siguiente:

$$M_o = f_o * (n * v)^{\frac{2}{3}} * dm^3 * 10^{-7} \quad (3-3)$$

Para lo cual:

$f_o \rightarrow$ Coeficiente de tipo de rodamiento, para romper a inercia en función de la velocidad.

$d_m \rightarrow$ Diámetro medio del rodamiento

Del catálogo SKF de rodamientos se obtiene los siguientes datos

$f_o \rightarrow 16.1$

$d_m \rightarrow 61 \text{ mm}$

Reemplazando los datos en la ecuación (3-3):

$$M_o = 16.1 * (12000)^{\frac{2}{3}} * 61^3 * 10^{-7} \quad (3-4)$$

$$M_o = 191.5 \text{ Nmm} \quad (3-5)$$

Se obtiene que el momento de rozamiento a vencer es de $M = 19.15 \text{ Ncm}$. Por lo tanto el factor de seguridad se calcula de la relación entre el momento calculado y el torque que entrega el motor dando como resultado la siguiente ecuación:

$$f = \frac{48}{19.15} \quad (3-6)$$

El factor de seguridad es $f = 2.5$.

Una vez obtenido el momento necesario para romper la inercia se calcula el momento de rozamiento ya puesto en marcha, para ello tenemos:

$$M = f_1 * (n * v)^{\frac{2}{3}} * dm^3 * 10^{-7} \quad (3-7)$$

Del catálogo SKF se tiene: $f_1 = 1.1$ y reemplazando los datos:

$$M = 1.1 * (12000)^{\frac{2}{3}} * 61^3 * 10^{-7} \quad (3-8)$$

$$M = 13.086 \text{ Nmm} \quad (3-9)$$

Dando como resultado que el sistema en marcha tiene un momento de rozamiento de $M = 1.31 \text{ Ncm}$.

Transmisión de movimiento

La transmisión de movimiento se realiza por medio de engranes, para prevenir posibles deslizamientos ya que uno de los factores más importantes es la sincronía y precisión del movimiento.

Dado que su única función es transmitir el movimiento del motor sin ningún cambio en torque o velocidad, los engranes a utilizar guardan una relación de 1:1. Por condiciones de diseño y espacio se decidió realizar engranes en ángulo recto, de un diámetro primitivo no mayor de $D_p = 50\text{mm}$.

Para el cálculo del módulo de los engranes partimos de la ecuación (3-10).

$$m = \frac{D_p}{N} \quad (3-10)$$

Donde:

$m \rightarrow$ modulo del engrane

$D_p \rightarrow$ diametro primitivo

$N \rightarrow$ numero de dientes

Debido a la relación que existe entre el modulo y el desgaste de los dientes se tomó como opción el uso de módulo dos, dado que un módulo uno hubiera sido dientes más pequeños y por ende más rápidos de desgastar. Reemplazando el valor del módulo en la ecuación (3-10) obtenemos $N \rightarrow 25$.

Luego, se procede a comprobar la carga límite de desgastes que parte de la formula empírica Buckingham:

$$F_w = 2 * D_p * b * k * \left(\frac{z_2}{z_1 + z_2} \right) \quad (3-11)$$

Donde:

$F_w \rightarrow$ carga limite de desgaste.

$b \rightarrow$ ancho de cara de los deintes. $b = 6mm$

$k \rightarrow$ factor de carga.

$z_1 \rightarrow$ numero de dientes del engranaje del motor.

$z_2 \rightarrow$ numero de dientes del engranaje arrastrado.

La anchura de cara por espacio se

El cálculo de k se lo realiza con la siguiente expresión:

$$k = (17 * BHN - 428) * \sin 20 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (3-12)$$

Siendo:

$BHN \rightarrow$ numero de dureza Brinell del plastico ABS.

E_1 y $E_2 \rightarrow$ modulos de elasticidad de los engranajes en plastico ABS.

$k \rightarrow$ factor de carga.

De la tabla de propiedades del plástico ABS de SUPERTONIC S.A. se obtuvo los siguientes datos:

$BHN \rightarrow 1520$

E_1 y $E_2 \rightarrow 2.3 \text{ KN/mm}^2$

Reemplazando los valores en la ecuación (3-12) se tiene:

$$k = (17 * 1520 - 428) * \sin 20 \left(\frac{2}{2300} \right) \quad (3-13)$$

$k \rightarrow 20.17$

Se procede a reemplazar los valores en la ecuación (3-11).

$$F_w = 2 * 5 * 0.6 * 20.17 * \left(\frac{1}{2} \right) \quad (3-14)$$

Obteniendo así una carga límite de $F_w = 6.05 \text{ N}$.

Ahora, se debe calcular la fuerza tangencial F_t en función al momento de rozamiento del rodamiento:

$$F_t = \frac{M}{r} \quad (3-15)$$

En el cual r es el radio del engranaje siendo $r = 2.5 \text{ cm}$, obteniendo así:

$$F_t = \frac{1.35}{2.5} \quad (3-16)$$

$F_t \rightarrow 0.54 \text{ N}$ Dando como resultado que $F_t < F_w$, de tal manera se comprueba que el desgaste del diente no supera los límites tolerables.

Descritos todos los elementos, el sistema de movimiento para el sensor LIDAR-Lite v2 se puede observar en la Figura 40

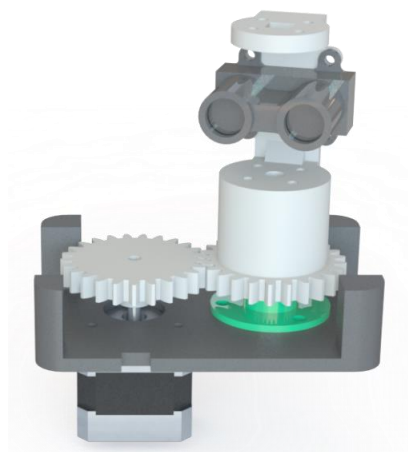


Figura 40: Sistema de giro en 360° para el sensor LIDAR-Lite v2

La resistencia mecánica de los elementos usados fue puesta a prueba en el Software para diseño mecánico SolidWorks, el cual es capaz de simular las deformaciones mediante un análisis por el método de elementos finitos. La pieza con el torque más crítico es el soporte del sensor, el resultado del análisis estático se muestra en la Figura 41

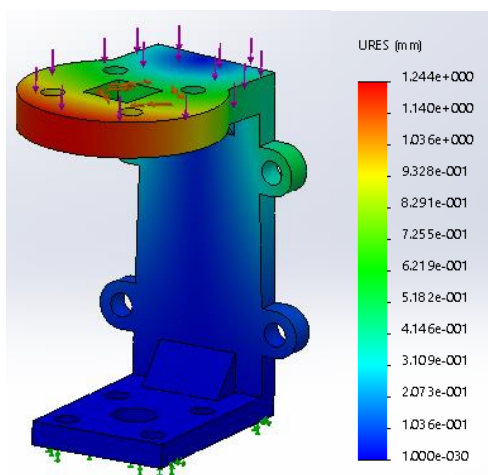


Figura 41: Resultado del análisis estático realizado al soporte del sensor LIDAR

Para el análisis realizado, se utilizó el momento de rozamiento al momento de romper la inercia calculado anteriormente a partir de los datos del rodamiento (0,2 Nm), además, se agregó la carga axial equivalente al peso de la carcasa, el sensor y el engranaje (1,47 N)

Una vez comprobada la resistencia del soporte, se realiza un análisis parecido para el ensamble encargado de la transmisión de movimiento cuyos resultados de deformación son mostrados en la Figura 42

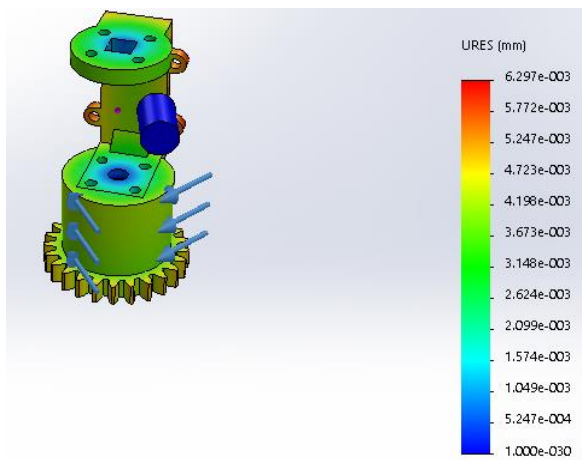


Figura 42: Resultados del análisis estático para la estructura de movimiento del sensor

Como se observa, la estructura aporta rigidez al diseño, teniendo deformaciones en el orden de las micras, valores totalmente aceptables para el diseño.

El sensor debe ser capaz de realizar mapeo en exteriores, para ello, es necesario diseñar una carcasa apta para la funcionalidad de los sensores, a la vez que los protege del clima. También es importante tomar en cuenta que el sensor GPS debe estar con vista directa al cielo sin obstaculizar la toma de puntos del sensor LIDAR.

Luego de realizar diversas pruebas se comprobó que el sensor funciona normalmente aun con algún material transparente ubicado entre los lentes y el objeto a medir (siempre y cuando sea plano), el material elegido para el caso es un acrílico semitransparente de 3mm de espesor, que actuará como protección sin obstaculizar las medidas a tomar. A partir de ello se diseñó la cubierta mostrada en la Figura 43, en la vista de corte se puede observar también como la misma se acopla al sistema de giro.

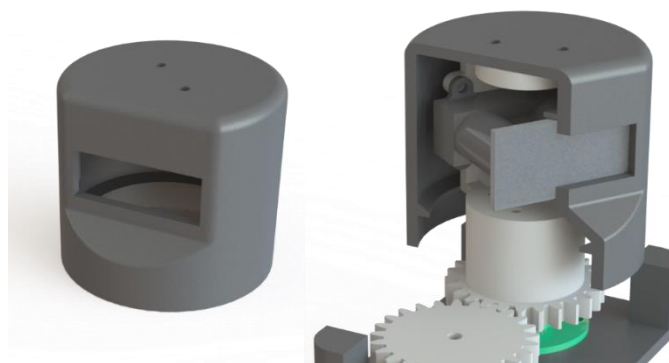


Figura 43: Cubierta para el sensor LIDAR

Con la cubierta diseñada y partiendo del diseño de una caja cúbica simple que mantendrá protegido al motor y el sistema de transmisión, se diseñó la pieza que se muestra en la Figura 44, capaz de permitir al sensor LIDAR el giro y que posee además un compartimento para alojar al sensor GPS.

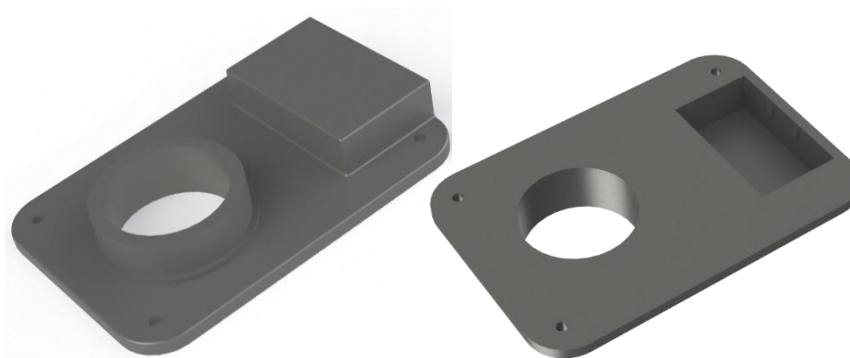


Figura 44: Tapa del sensor LIDAR

El acople entre la tapa y la cubierta del sensor se realiza gracias a un rodamiento de bolas, que además de impedir el paso del agua, mantiene a las partes móviles girando sin un mayor rozamiento. Dicho acople puede ser observado en la Figura 45, donde se muestra una versión simplificada del rodamiento.

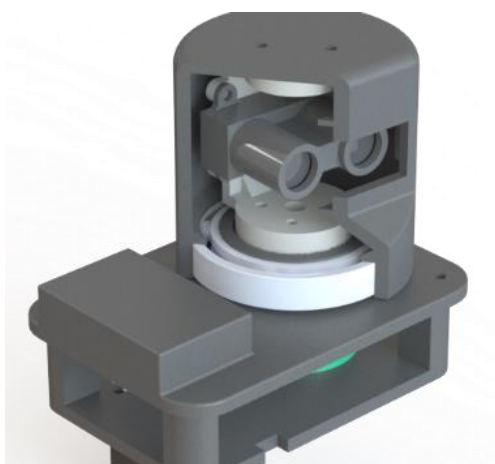
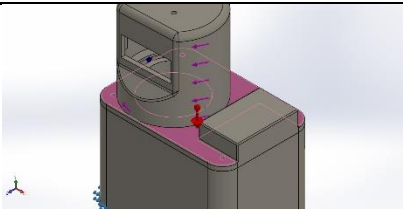
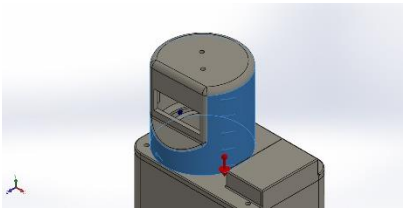
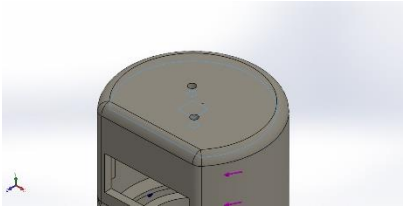


Figura 45: Acople entre el sistema y la cubierta

La estructura externa fue sometida a un análisis estático de fuerzas, suponiendo las cargas máximas mostradas en la Tabla 22.

Tabla 22:
Cargas aplicadas a la estructura del sensor

Carga	Ubicación	Detalles
Gravedad		Referencia: Cara< 1 > Valores: 9.81 m/s ² Unidades: SI
Torsión		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 0.2 N.m
Fuerza		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: -1.5 N

Los resultados obtenidos después de realizado el análisis estático mostrados en la Figura 46, arrojan un desplazamiento máximo en el punto crítico de 1,29 micrómetros, se puede decir entonces que el diseño mecánico cumple con las expectativas.

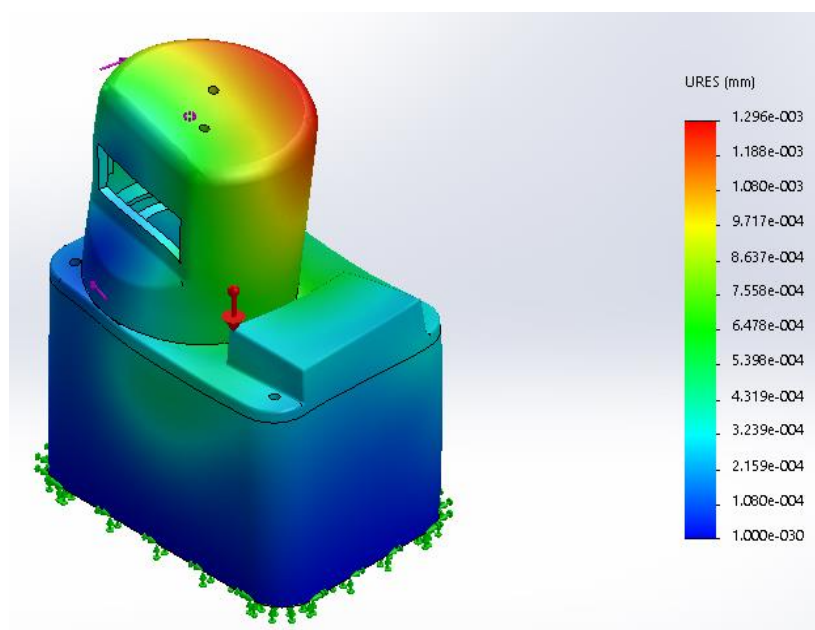


Figura 46: Resultados de deformación para el análisis estático realizado a la estructura del sensor

Finalmente la Figura 47 muestra el sensor completamente ensamblado, la carcasa principal cuenta con el espacio suficiente para alojar al motor y el cableado interno del sensor.

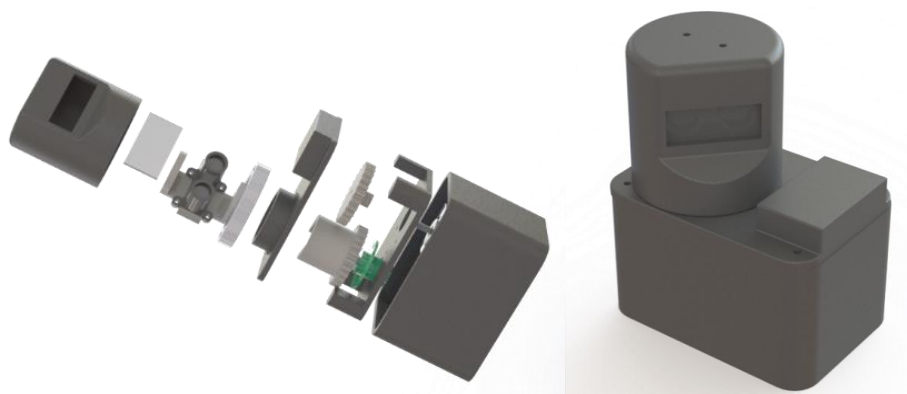


Figura 47: Sensor LIDAR completamente ensamblado

3.3.3.2. Diseño electrónico

La parte electrónica del sistema se ha diseñado de manera que permita una conexión fácil al controlador central del robot, para ello, se han diseñado dos circuitos electrónicos separados, uno ubicado en el sensor y el otro en el controlador.

Los sensores podrían ser conectados directamente a la placa de control, sin embargo, serían necesarios 12 pines; para ello el circuito electrónico alojado en la caja del sensor se

encarga de las conexiones para minimizar el número de cables que van hacia el robot, además, permite que el mismo tenga una estructura modular y facilita las conexiones mediante el uso de conectores tipo Molex. Gracias al diseño, el número de cables necesarios para la conexión de los sensores a la placa de control se reducen de 12 a seis. Un esquema básico de conexión se muestra en la Figura 48 y el diagrama esquemático del circuito en la Figura 49.

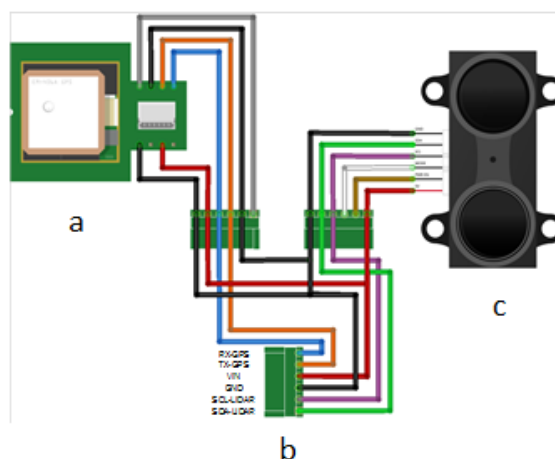


Figura 48: Esquema de conexión interna de los sensores (a) GPS EM-506, (b) placa de conexión y (c) Lidar Lite V2

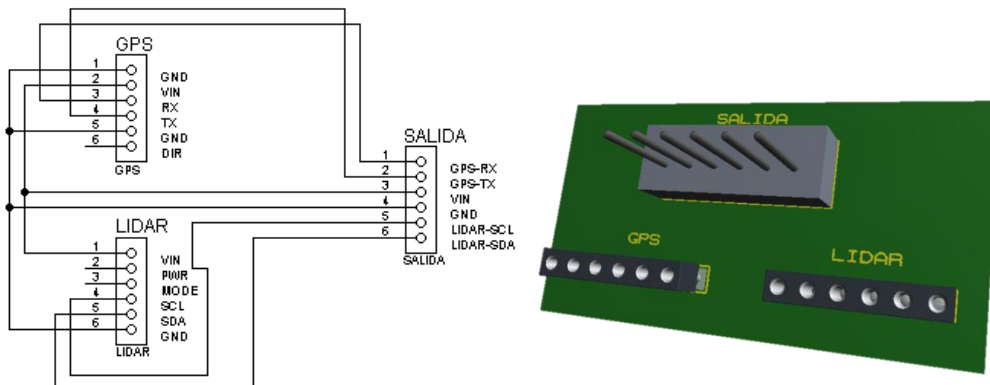


Figura 49: Diagrama esquemático y representación 3D del circuito de sensores

Para el motor paso a paso los cables del motor (4 en total) se dirigen directamente al controlador central, para su control se utiliza al controlador para motores A4988, el diagrama de conexión del mismo se presenta en la Figura 50

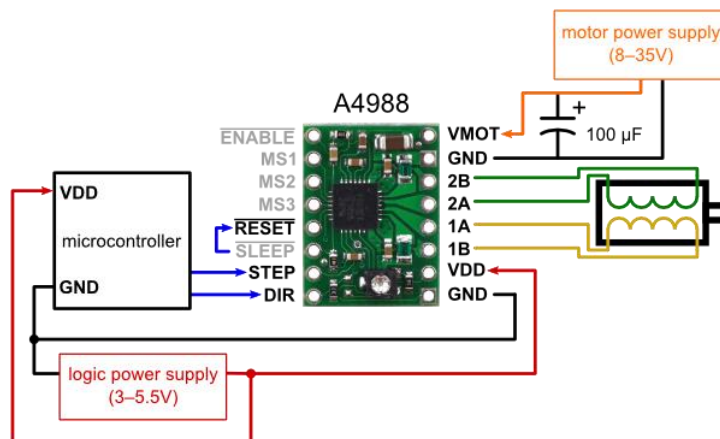


Figura 50: Diagrama de conexión del controlador A4988.
 Fuente: <https://www.pololu.com/product/1182>

El controlador A4988 permite un control en micro pasos de hasta 1/16 de paso a la vez, los pines digitales de dirección y paso permiten un control fácil del motor únicamente con pulsos digitales. Se utilizará la configuración de paso completo y se enviará un paso del motor por cada dato recibido del sensor LIDAR-Lite.

En el controlador central del robot se aloja otro circuito electrónico, éste toma los conectores de la placa de sensores y del motor, ambos provenientes del sensor LIDAR diseñado, contiene al controlador A4988, y se conecta a la placa central del controlador. Su diagrama esquemático y representación 3D se muestra en la Figura 51.

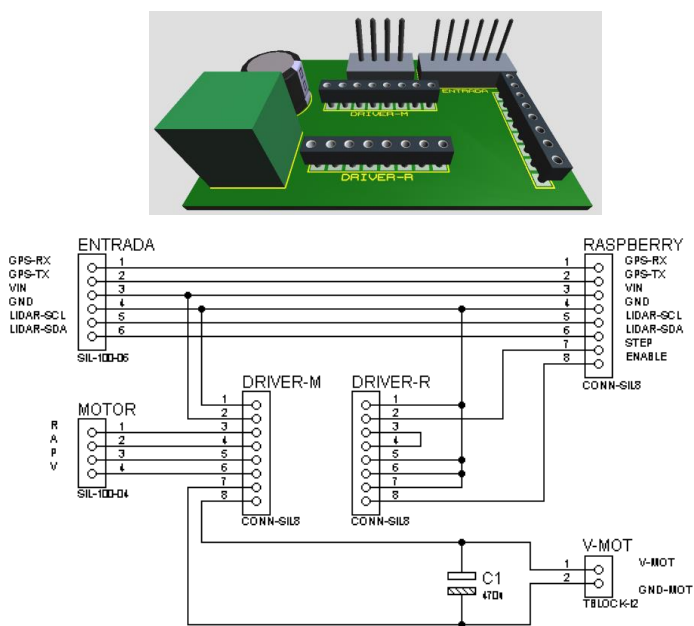


Figura 51: Diagrama esquemático y representación 3D del circuito del controlador

3.3.3.3. Sistema de control

El sistema es representado por medio de un diagrama de flujo que se divide en dos procesos principales como son: GPS y LIDAR; cada uno trabaja por separado para obtención de datos necesarios para la navegación.

El GPS se inicializa con la energía e inmediatamente se dispone a buscar y testear alternativas de satélites para una ubicación más precisa; una vez obtiene conexión con los satélites disponibles genera tres mensajes: Velocidad, Hora - fecha y Longitud – Latitud.

El LIDAR inmediatamente se conecta envía datos de distancia, luego cuando se activa el mapeo se cumple la condición de que por cada dato de distancia el motor gira un paso; el proceso se repite hasta cumplir 200 pasos (una vuelta entera) y envía el mensaje.

El lazo de control para el sistema se puede entender mediante el diagrama de flujo que expresa la Figura 52.

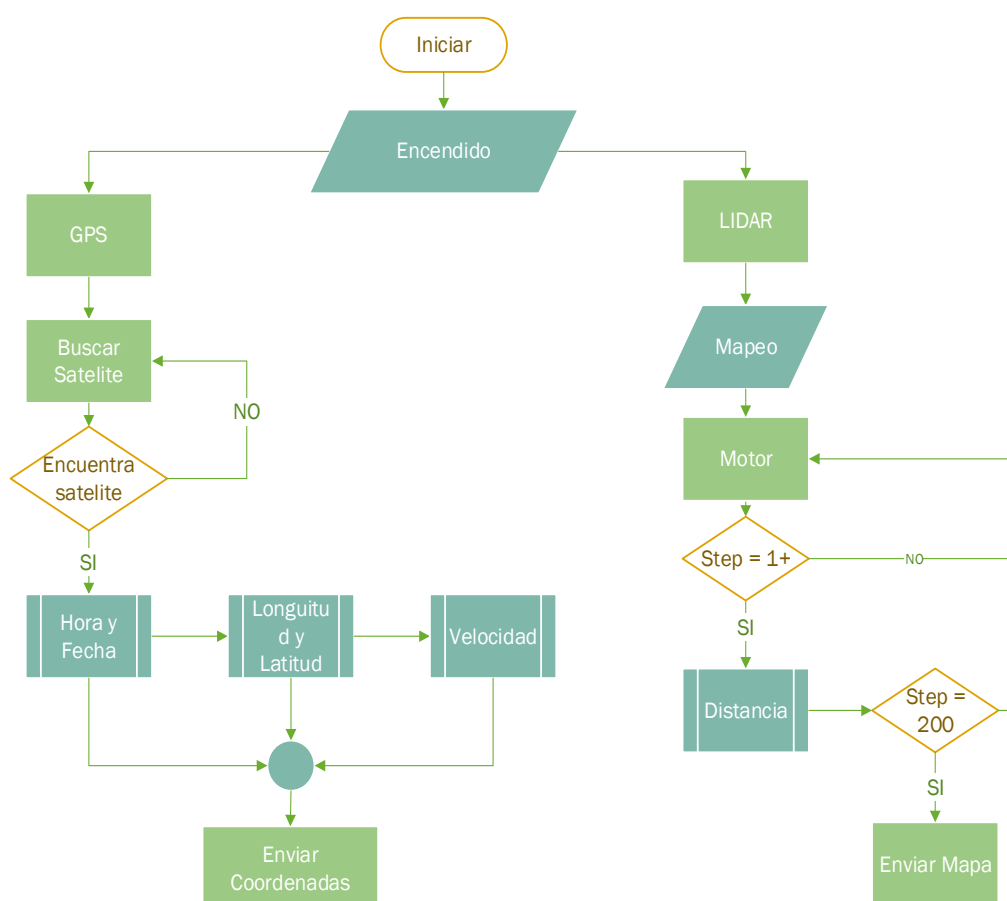


Figura 52: Diagrama de flujo para el funcionamiento del sensor GPS-LIDAR

Los mensajes recibidos por ambos sensores, son procesados y publicados como tópicos que pueden ser reconocidos por el sistema operativo ROS, el sensor LIDAR usa un mensaje del tipo: sensor_msgs/LaserScan. El receptor GPS, utiliza un mensaje: sensor_msgs/NavSatFix. Ambos tipos de mensaje forman parte del paquete sensor_msgs que provee la definición de los mensajes a usar por varios tipos de sensores en ROS. La información completa se halla en: http://wiki.ros.org/sensor_msgs.

3.4. Módulo 2. Monitoreo

3.4.1. Subsistema 1. Cámara a bordo

El subsistema es el encargado de la captura y procesamiento de datos para la transmisión en tiempo real que es necesaria para el sistema de teleoperación. Entre las principales opciones se tiene: a) Cámara Web y b) Cámara IP.

3.4.1.1. Alternativas para diseño

Cámara Web

Es una cámara digital diseñada para el uso conjunto con una computadora o procesador lo suficientemente robusto que permita captura y transmisión de imágenes a través de Internet o una red, ya sea a una página web o a través de otras computadoras de forma privada.

Ventajas

- Conexión Plug and Play.
- Fácil instalación.
- Costo bajo.

Desventajas

- Conexión por cable.
- Uso restringido para interiores.

Cámara IP

La cámara IP son dispositivos capaces de conectarse a la red por medio de una Ip y cumplir funciones dentro la misma como emitir vídeo por medio de un ordenador incorporado,

también permite el envío de datos comprimidos ayudando a tener una mayor velocidad y por ende una mejor calidad en la imagen.

Ventajas

- Transmisión en tiempo real directo a internet.
- Conexión inalámbrica.
- Activación mediante movimiento de la imagen.

Desventajas

- Alto costo.
- Uso con software dedicado.
- Difícil implementación.

Para la transmisión en tiempo real es necesario un dispositivo capaz de recibir y visualizar las imágenes captadas por la cámara a bordo del robot y mostrarlas en una pantalla. Entre las alternativas destacan: a) PC, b) Smartphone y c) Sistema Embebido.

PC

Computador personal u ordenador generalmente de tamaño medio y usado por un solo usuario con gran capacidad de procesamiento con un monitor incluido y periféricos de entrada y salida.

Ventajas

- Monitor incluido.
- Gran capacidad de procesamiento.
- Alta disponibilidad en el mercado.
- Software altamente desarrollado.
- Sistema robusto.

Desventajas

- Posibilidad de movimiento limitado.
- Relativamente pesado.

- Costo energético alto.

Smartphone

Teléfono celular con gran capacidad de procesamiento diseñado para la comunicación y el entretenimiento.

Ventajas

- Capacidad de procesamiento mediana.
- Pantalla táctil.
- Costo energético bajo.
- Herramientas desarrolladas para monitoreo.

Desventajas

- Pantalla relativamente pequeña.
- Limitaciones en cuanto a conexión de periféricos.
- Costo elevado para dispositivos de buenas prestaciones.

Sistema Embebido.

Sistema propio desarrollado a partir de componentes electrónicos dedicado exclusivamente para el monitoreo de la plataforma.

Ventajas

- Sistema dedicado al monitoreo.
- Diseño flexible.
- Bajo costo.

Desventajas

- Dificultad de fabricación.
- Dificultad de programación.
- Disponibilidad de componentes baja.

3.4.1.2. Evaluación y selección de alternativas

Se realizó pruebas con las dos cámaras y la cámara IP no fue compatible con el sistema embebido ya que utiliza un software privado, de tal manera se tomó la decisión de seleccionar

la cámara web, dado que esta si es compatible; los otros factores relevantes para la decisión fueron:

- La cámara web tiene conexión Plug and Play lo que facilita la instalación y el uso.
- El costo de una cámara web es mucho menor a diferencia del costo de una cámara Ip.
- La visualización en tiempo real requiere de la transmisión de datos para lo cual las dos cámaras son igual de aptas.

La cámara web seleccionada es una Pc Web Camera ANERA (Figura 53) con las siguientes características:

Tabla 23:
Características de la cámara web ANERA

Característica	Magnitud
Sensor de imagen	1/7" CMOS sensor
Cuadros por segundo	30 fps en adelante
Distancia de enfoque	40 mm en adelante
Angulo de visión	54
Formato de imagen	RGB24, 1420
I/O Interfaz	USB 2.0



Figura 53: Cámara web ANERA
Fuente: <https://www.alibaba.com>

Se realizó un análisis en base a la disponibilidad, concluyendo que el sistema más eficiente para el uso con la plataforma es una PC. La base para esta decisión es:

- El sistema operativo para robótica (ROS), requiere de una capacidad de procesamiento alta, la cual se puede encontrar en una PC y un sistema embebido.
- A diferencia del sistema embebido una PC cuenta con todos los periféricos de entrada y salida necesarios.
- El Laboratorio de Manufactura dispone de una PC que será dedicada al proyecto.
- Una PC dispone de una gran versatilidad para manejo de sistemas operativos, lo cual permite seleccionar un software libre para manejo y uso.

Dado que la selección es una PC no se puede dar alternativas, pero las características mínimas recomendadas son:

- Microprocesador Core 2 Duo 1,6 GHz.
- Memoria RAM 2 Gb.
- Al menos 16 Gb de espacio en el disco duro.
- Resolución de pantalla de al menos 1366 x 768

3.4.2. Subsistema 2. Interfaz

3.4.2.1. Alternativas para diseño

El proyecto consta de criterios de diseño, los que serán usados como punto de partida para la selección del software y realización del HMI; a continuación se detalla alguno de los criterios:

- Software libre.
- Compatible con el sistema embebido Raspberry pi 2.
- Software escalable y adaptable.
- Orientado hacia robótica.
- Entorno para desarrollo de HMI.
- HMI fácil de usar.
- Video en tiempo real.

En función a los criterios anteriormente citados se enlista algunas de las alternativas tanto para framework como para diseño de HMI:

Framework

- Robot Operating System (ROS)
- Microsoft Robotics Developer Studio(MRDS)
- Mobile Robot Programming Toolkit

HMI

- QT Designer
- GTK+
- wxWidgets

3.4.2.2. Evaluación y selección de alternativas

Es muy importante tomar en cuenta que el proyecto se basa en un control tele operado lo que implica que una persona va a mover la plataforma desde un lugar alejado y por ende no va a tener visión alguna del medio en el que se desenvuelve. Para ello es necesario mostrar la mayor cantidad de información en la interfaz sin que se vuelva muy compleja para el usuario. Por ello se decidió el uso de los siguientes programas:

Sistema Operativo Robótico (ROS, Robot Operating System) es un sistema operativo o también conocido como framework que sirve como base para el desarrollo de software robótico, es una plataforma para el uso y creación de aplicaciones robóticas. Esta plataforma provee de servicios estándar como abstracción de software, control de dispositivos, implementación de funcionalidades, envío y recepción de mensajes entre procesos y manejo de paquetes, permite el uso de distintos lenguajes de programación como Python, C++, Lisp además de muchas otras como java, Lua, Octave, etc.

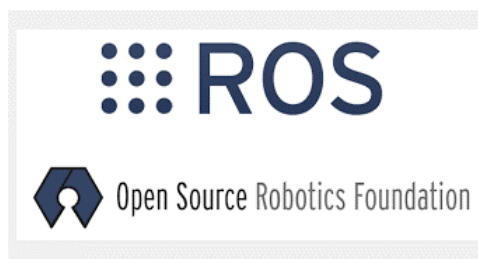


Figura 54: Plataforma ROS

ROS (Figura 54) está basada en la arquitectura de grafos mostrada en la Figura 55, maneja nodos como los encargados del procesamiento, envío y recepción de datos y tópicos como los múltiples mensajes de sensores, control, estados, planificaciones y actuadores.

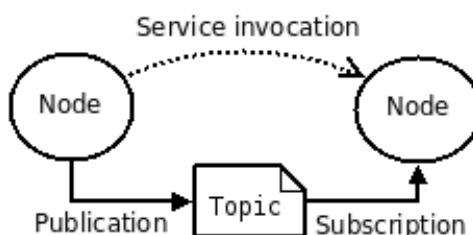


Figura 55: Arquitectura de trabajo ROS

Puede ser ejecutado sobre máquinas con plataformas Unix, principalmente Ubuntu y MacOS X, aunque por parte de la comunidad puede encontrarse soporte para otras plataformas como Fedora, Gentoo, Aldebaran, etc.

Una de las ventajas principales del uso de ROS es ros-pkg, una red de paquetes aportados por la contribución de usuarios que implementan todo tipo de funciones, como se habló anteriormente ros es un software libre por lo tanto se puede encontrar una cantidad inmensa de programas en el internet tales como, planificación, percepción, simulación, etc.

Qt (Figura 56) es un programa multiplataforma usado para desarrollar aplicaciones de interfaz gráfica, por medio de una extensa biblioteca virtual con varias opciones y ejemplos; también sirve para la creación de programas sin interfaz gráfica, como herramientas para la línea de comandos y consolas para servidores enfocadas en un fácil manejo. En forma general la interfaz trabaja por medio de plugins, lo que nos permite crear una interfaz de forma modular.



Figura 56: Qt

El programa fue establecido como un software libre y de código abierto a través de Qt Project, debido a esto tiene mucha contribución de la comunidad, a su vez está financiado y apoyado por desarrolladores Nokia, Digia, Knoll y Lars. Utiliza un entorno de escritorio para

sistemas como GNU/Linux o FreeBSD, entre otros, lo que permite el desarrollo visual de interfaces agradables y fluidas.

Qt combina edición, depuración, gestión, localización y herramientas de compilación por medio de un potente y completo IDE (entorno de programación). Usa lenguajes de programación como C++, Python y Java; a parte recientemente se exploró la posibilidad de uso de aplicaciones en Smartphone Android con resultados positivos. Es un programa que abre un mundo de posibilidades para desarrolladores.

La importancia de Qt radica en que también es compatible con ROS por medio de una herramienta llamada RQT la cual permite el uso de los plugins creados en Qt y llevarlos a un entorno gráfico de ROS.

3.4.3. **Diseño final**

El diseño del Software de programación es orientado a dejar una base para el desarrollo escalable y adaptable para nuevos proyectos que se podrían acoplar tomando como punto de inicio la plataforma robótica de exteriores.

La interfaz gráfica debe constar con las siguientes partes:

- Sistema de control o mando.
- Sistema de monitoreo en tiempo real
- Sistema de visualización del mapeo y mapa descargado por GPS

Por este motivo se seleccionó un software acorde a las necesidades y se realizó una interfaz amigable con el usuario que cuenta con la cantidad necesaria de datos para hacer más fácil su manejo. La interfaz posee ventanas que contienen los distintos valores a usar en la teleoperación, ello se ilustra en la Figura 57. La disposición de las ventanas durante el proceso de diseño se ha determinado:

1. Visualización del mapa en tiempo real así como del modelo 3D de la plataforma
2. Imagen proveniente de la cámara a bordo
3. Controles para el movimiento del sistema



Figura 57: Diseño de un diagrama básico de la interfaz HMI

Además, el usuario será capaz de controlar los movimientos de la plataforma mediante botones en el teclado del PC, brindando al operario una manera mucho más cómoda de realizar la teleoperación.

3.4.3.1. Diseño mecánico

La cámara a bordo estará ubicada a 40 cm por sobre la plataforma, de ésta manera, se obtiene un ángulo de visión más grande, así el operario puede tener un mejor control durante la teleoperación. Para ello, se ha diseñado un soporte para la cámara que además protege a la misma del clima.

Para mantener la estabilidad de la cámara y el peso lo más bajo posible, la estructura deberá ser lo más simple, constará entonces de un tubo PVC de 3/4 de pulgada unido a la estructura mediante un acople para tanques que provee estabilidad e impermeabilidad.

Sobre el tubo PVC estará montado un soporte diseñado específicamente para la cámara a utilizar, la cual estará cubierta por un domo de acrílico transparente encargado de proteger a la cámara de la lluvia y el polvo presentes en el ambiente. Ambas partes se ilustran en la Figura 58.



Figura 58: Soporte y domo para la cámara

3.5. Módulo 3. Estructura

3.5.1. Subsistema 1. Ruedas

Posibles modificaciones que permitan al robot para exteriores poder subir una grada de forma que sea todo terreno.

3.5.1.1. Alternativas para diseño

Las alternativas son: el cambio de neumáticos o reducir la distancia entre ejes.

Cambio de neumáticos

El robot consta con neumáticos de diámetro 250 mm y al momento de subir gradas de 150mm o más, este queda sin tracción con las ruedas al aire; dando como la opción más lógica el cambio de neumáticos por unos de mayor diámetro.

Ventajas

- Fácil de implementar.
- Costo relativamente bajo.
- Solución rápida.
- Aumento en la distancia de la plataforma al piso.

Desventajas

- Disminución en la velocidad del robot.
- Aumento en la altura total.

Reducir distancia entre ejes

El robot consta de una distancia entre ejes de 480 mm la cual es muy larga comparada con el tamaño del robot, lo que resulta en el mismo problema anteriormente descrito, haciendo difícil el sortear obstáculos grandes.

Ventajas

- No influye en la altura del robot.

Desventajas

- Dificultad en la implementación.
- Reconstruir la estructura.

- Reducción del espacio interno de la plataforma.
- Menor estabilidad.

3.5.1.2. Evaluación y selección de alternativas

La alternativa más lógica es el cambio de neumáticos. Debido a los siguientes aspectos:

- El cambio de neumáticos no implica un rediseño de la estructura existente.
- El aumento de la distancia de la plataforma al piso favorece la capacidad todo terreno permitiendo sortear obstáculos más grandes.
- El factor económico y el tiempo de ejecución son decisivos; es mucho más barato y rápido el cambio de neumáticos.

Las alternativas más destacadas para ruedas se enumeran en la Tabla 24.

Tabla 24:
Alternativas para el cambio de neumáticos

	SOLUCIÓN	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
A	Rueda para carretilla Mintcraft		COSTO: \$18,90 Diámetro: 11" - 15" Ancho: 4" - 10 cm Diámetro eje: 5/8" - 15.8 mm
B	Rueda para tractor podadora		COSTO: \$100 Diámetro: 13" Ancho: 5" - 13 cm Diámetro eje: 3/4" - 19 mm
C	Rueda para podadora manual		COSTO: \$43,50 Diámetro: 14" - 35,5 cm Ancho: 3" - 8 cm Diámetro eje: 1/2" - 12.7 mm

Tabla 25:
Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3, subsistema 1

Criterio	Costos	Labrado	Montaje	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Pondera.
Costos	-	5	5	2,5	13,5	0,40
Labrado	0	-	2,5	0	3,5	0,10
Montaje	0	2,5	-	0	3,5	0,10
Disponibilidad	2,5	5	5	-	13,5	0,40
				Σ	34	1,00

Tabla 26:
Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1

Costos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,47
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	2,5	5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 27:
Ponderación de labrado de neumáticos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1

Labrado	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 28:
Ponderación de facilidad de montaje para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1

Montaje	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 29:
Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 1

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 30:
Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 3, subsistema 1

	Costos	Labrado	Montaje	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,1875	0,0343	0,0486	0,1875	0,46	46%
Solución B	0,0221	0,0629	0,0486	0,1875	0,32	32%
Solución C	0,1875	0,0057	0,0057	0,0221	0,22	22%
				Σ	1,00	

Finalmente, se realiza el diseño y cálculo para obtener la nueva dimensión de rueda necesaria para poder sortear una grada, se calcula también del nuevo peso máximo que será capaz de soportar la plataforma robótica para exteriores. En base de la estructura realizada en: (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015), se toma en cuenta parámetros en los que no se realiza cambio alguno, tal es el caso de los motores que cumplen con las características enunciadas en la Tabla 31

Tabla 31:
Características de los motores

Características	Magnitud (unidad)
Voltaje de operación	12 V
Corriente máxima	4 A
Potencia nominal	50 W
Torque	50 Nm

Cálculo radio de la llanta

Se establece una altura de grada estándar de 150mm que la plataforma será capaz de sortear, los datos de la plataforma para exteriores se observan en la Figura 59

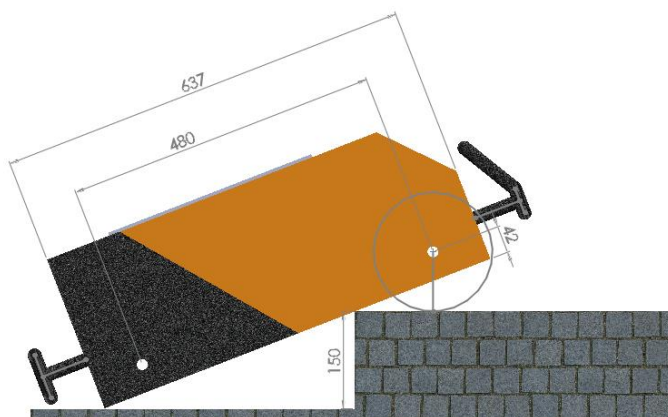


Figura 59: Estructura y grada (medidas)

Luego, por medio del método gráfico con ayuda de un software CAD se comprueba el ángulo que crea la plataforma con respecto a la grada en el punto más crítico, es importante señalar que esto sucede en el momento que las ruedas delanteras han logrado subir la grada y ésta se encuentra cerca de la mitad de la plataforma.

En la Figura 60 se muestra de forma geométrica la disposición de la plataforma robótica sobre la grada tomando en cuenta que el punto de coincidencia es en la mitad exacta.

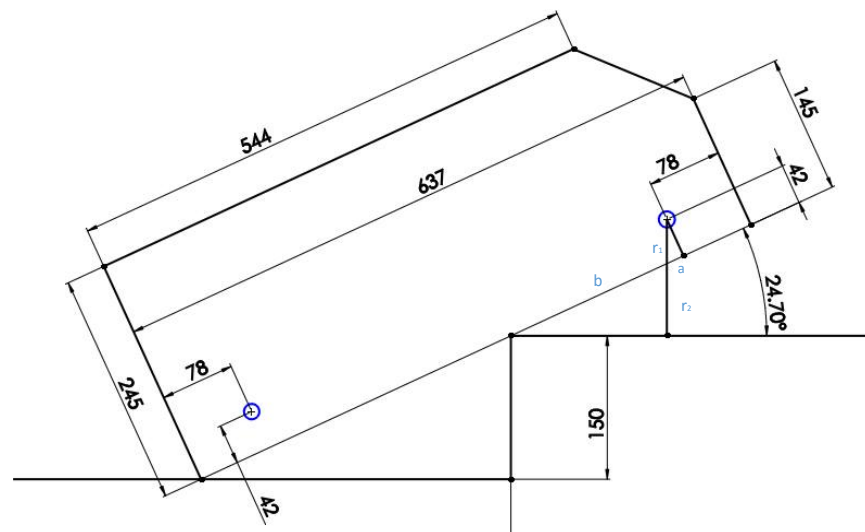


Figura 60: Método gráfico para el cálculo del ángulo crítico

Siendo el ángulo de 24.7 grados con el que se realizara todos los cálculos. Para un mejor desarrollo se ha separado únicamente los triángulos formados, donde se trabaja la geometría.

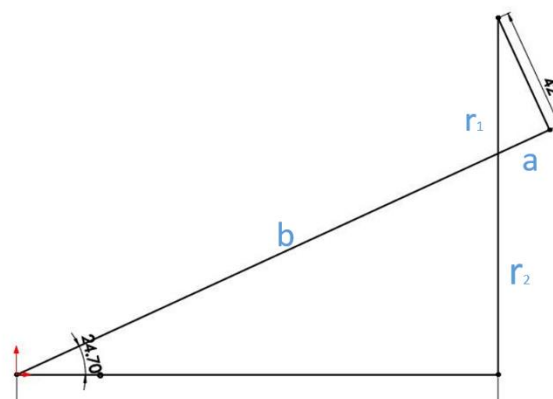


Figura 61: Geometría del ángulo crítico

A partir de la Figura 61:

$$r = r_1 + r_2 \quad \rightarrow \text{radio de la llanta minimo para subir una grada de 150mm}$$

$$a + b + 78 = \frac{637}{2} \quad \rightarrow \text{es la mitad de la plataforma robotica de exteriores}$$

Se halla el valor de r_1 mediante:

$$r_1 \sin(65.3) = 42 \quad (3-17)$$

$$r_1 = \frac{42}{\sin(65.3)} \quad (3-18)$$

$$r_1 = 61.58 \text{ mm} \quad (3-19)$$

Se procede al cálculo de la variable 'a' dónde:

$$a = r_1 \sin(24.7) \quad (3-20)$$

$$a = 61.58 \sin(24.7) \quad (3-21)$$

$$a = 25.73 \text{ mm} \quad (3-22)$$

Una vez obtenidos estos valores se obtiene que el valor de la variable 'b'

$$b = \frac{637}{2} - a - 78 \quad (3-23)$$

$$b = 214.77 \quad (3-24)$$

Se calcula el valor de r_2

$$r_2 = b \sin(24.7) \quad (3-25)$$

$$r_2 = 214.77 \sin(24.7) \quad (3-26)$$

$$r_2 = 89.75 \text{ mm} \quad (3-27)$$

Finalmente, el radio r :

$$r = r_1 + r_2 \quad (3-28)$$

$$r = 61.58 + 89.75 \quad (3-29)$$

$$r = 151.33 \text{ mm} \quad (3-30)$$

El cálculo refleja que el radio mínimo necesario para el neumático es de: 151.33 mm, por diseño y disponibilidad se elige la Rueda para carretilla Mintcraft 13" con radio 165mm que excede favorablemente el radio calculado.

Cálculo capacidad de carga

Para el cálculo del peso máximo, se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje x en el instante justo que pierde la inercia y empieza a moverse; se obtiene:

$$\sum F_x = m \cdot a = m \cdot g_x - f \quad (3-31)$$

Donde: m es el peso máximo de carga y a es la aceleración del sistema con el que logra romper la inercia que para el sistema es $0,02 \frac{m}{s^2}$.

Luego de la sumatoria de momentos respecto al centro de la rueda se permite establecer la siguiente relación:

$$T = f \cdot R \quad (3-32)$$

Donde: T es el torque del motor, f es la fuerza de rozamiento y R es el radio de la rueda

Ahora, se realiza el análisis de fuerzas en estado de reposo y se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$m \cdot g_x = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (3-33)$$

$$m \cdot g_y = m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (3-34)$$

Donde m sigue siendo el peso máximo a calcular, g_x y g_y son las componentes de la gravedad en los ejes x e y respectivamente.

Reemplazando las ecuaciones (3-31) y (3-33)se obtiene:

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin \theta + \frac{T}{R} \quad (3-35)$$

Despejando m en (3-35) obtenemos:

$$m = \frac{T}{[a + g \cdot \sin \Theta] \cdot R} \quad (3-36)$$

En la ecuación (3-36) se expresa el peso máximo en función del torque del motor, el cual fue elegido durante la construcción de la plataforma, la fórmula esta expresada para el cálculo de un único motor por ello se debe multiplicar por 4 (número total de motores). También se toma en cuenta la eficiencia del motor y el factor de seguridad dando como resultado la siguiente ecuación.

$$m = \frac{1}{f_s} \cdot \left(\frac{e}{100} \right) \cdot \frac{4 \cdot T}{[a + g \cdot \sin \Theta] \cdot R} \quad (3-37)$$

Donde f_s es el factor de seguridad con un valor de 2 y e es la eficiencia del motor que se estima en 90% según datos del fabricante. Reemplazando los valores:

$$m = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{90}{100} \right) \cdot \frac{4 \cdot 50}{[0,02 + 9,8 \cdot \sin 45] \cdot 0,165} \quad (3-38)$$

Como resultado de la ecuación (3-38), la carga máxima incluyendo el peso de la plataforma es de 65,25 kg.

3.5.2. Subsistema 2. Cubierta

3.5.2.1. Alternativas para diseño

Las alternativas son: la inclusión de elementos externos para impedir el paso del agua o la reconstrucción parcial de la estructura

Sellado: incluir elementos externos que no permitan el paso de agua o humedad al interior de la plataforma.

Ventajas

- Fácil implementación.
- Bajo costo.
- Sin cambios notables en la estructura.

Desventajas

- Disponibilidad baja de ciertos elementos.
- Requiere mantenimiento.

Reconstrucción: rediseño y reconstrucción de la estructura para lograr que sea impermeable.

Ventajas

- Impermeabilización absoluta.
- Posibilita mejoras en la capacidad todo terreno.

Desventajas



- Difícil implementación.
- Alto costo.
- Cambios notables en la estructura.

Después de analizar las alternativas de solución; la alternativa elegida es el Sellado. Debido a los siguientes aspectos:

- El sellado no implica un rediseño completo de la estructura existente.
- La reconstrucción implica la adición de elementos diseñados para impermeabilizar elevando el costo.
- El factor económico y el tiempo de ejecución son decisivos; es mucho más barato y rápido el sellado.

Las alternativas más destacadas para sellar son las mostradas en la Tabla 32.

Tabla 32:
Alternativas para la impermeabilización de la plataforma

	SOLUCIÓN	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
A	Leak Seal clear spray		COSTO: \$15,90 Revestimiento en caucho Sellado de grietas pequeñas Seca en 24 horas
B	Sika Boom		COSTO: \$6,17 Totalmente endurecido se recorta y trabaja con facilidad Seca en 5-12 horas Espuma para sellar agujeros
C	Sika Bond AT-Metal		COSTO: \$6,79 Adhesivo especial para pegado elástico de metales. Adecuado para sellados externos, pegado de fachadas de metal, láminas de metal, sellados de juntas Buena resistencia a la intemperie y agua

En base a las alternativas mostradas, se aplica el método de criterios ponderados.

Tabla 33:
Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3, subsistema 2

Criterio	Costos	Manejo	Resistencia	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Pondera.
Costos	-	2,5	0	2,5	6	0,18
Manejo	2,5	-	0	0	3,5	0,10
Resistencia	5	5	-	2,5	13,5	0,40
Disponibilidad	2,5	5	2,5	-	11	0,32
				Σ	34	1,00

Tabla 34:
Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2

Costos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 35:
Ponderación de facilidad de manejo para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2

Manejo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,47
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	2,5	5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 36:
Ponderación de resistencia para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2

Resistencia	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,19
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,19
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Σ	18	

Tabla 37:
Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 3, subsistema 2

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
			Σ	18	

Tabla 38:
Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 3, subsistema 2

	Costos	Manejo	Resistencia	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,0098	0,0486	0,0772	0,0180	0,15	15%
Solución B	0,0833	0,0057	0,0772	0,1528	0,32	32%
Solución C	0,0833	0,0486	0,2426	0,1528	0,53	53%
				Σ	1,00	

La solución elegida es entonces el adhesivo Sika Bond AT-Metal.

3.5.3. Diseño final

3.5.3.1. Diseño mecánico

La plataforma utiliza para su locomoción un sistema “skid steer” o de giro por deslizamiento, éste sistema es usado comúnmente en tanques y buldóceres. En éste tipo de vehículos, las ruedas a cada lado pueden girar a distintas velocidades de frente o de reversa, siempre y cuando todas las ruedas de un lado mantengan la misma velocidad; no existe un mecanismo explícito de giro, como se ilustra en la Figura 62, el mismo se realiza al girar las ruedas a distinta velocidad o dirección haciendo que deslicen o patinen sobre el suelo.

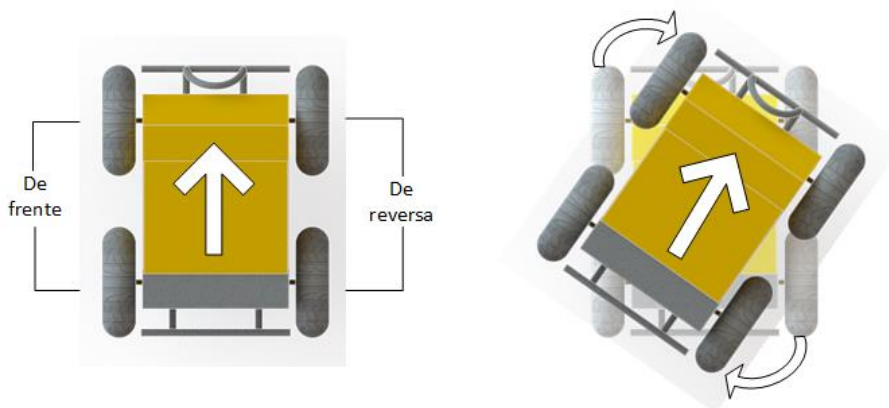


Figura 62: Plataforma realizando un giro (sistema skid steer)

El diseño completo de la estructura que se usó como base para el desarrollo del proyecto se lo puede observar en el Anexo F.

Cálculo de ejes

Los ejes fueron rediseñados de manera que puedan acoplarse a las nuevas ruedas, el material a usar será acero de transmisión AISI 1020 cuyas características principales son:

- Esfuerzo de fluencia 205 MPa (29700 PSI)
- Esfuerzo máximo 380 MPa (55100 PSI)
- Elongación máxima 25% (en 50mm)
- Módulo de elasticidad 205 GPa
- Densidad 7,87 g/cm³

Una vez seleccionado el material, se procede a calcular los esfuerzos en el eje, a fin de poder determinar el diámetro mínimo a usar. El Torque máximo que soportará el eje para este caso será el torque que puede entregar el motor, es decir, 50 Nm. La carga máxima será el peso total de la plataforma y la carga extra (50 Kg en total) suponiendo para el caso que esté apoyada únicamente en una rueda.

A continuación, con las cargas determinadas, se procede a realizar un diseño básico de la forma del eje como se muestra en la Figura 63; se observa la ubicación del motor y la rueda. Es importante el uso de dos rodamientos para proporcionar soporte estable, generar cargas balanceadas en los mismos y minimizar los momentos de flexión.

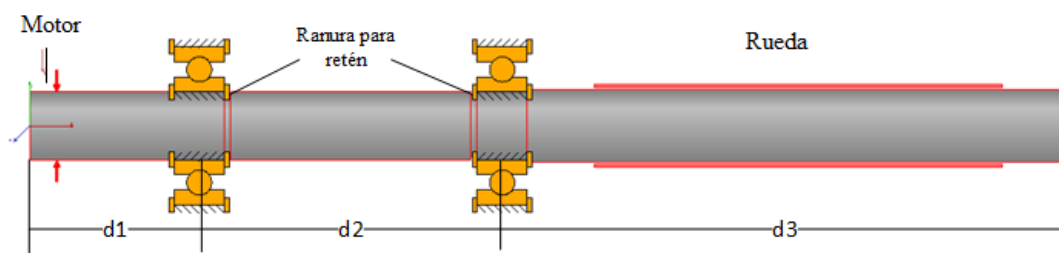


Figura 63: Diagrama básico del eje a diseñar

Las distancias mostradas son: $d_1 = 37,5\text{mm}$; $d_2 = 67\text{mm}$ y $d_3 = 125,5$. Obsérvese que la fuerza en la rueda se ha tomado como una carga distribuida. A partir de allí, se realizan los diagramas de fuerza cortante (Figura 64) y momento flector (Figura 65).

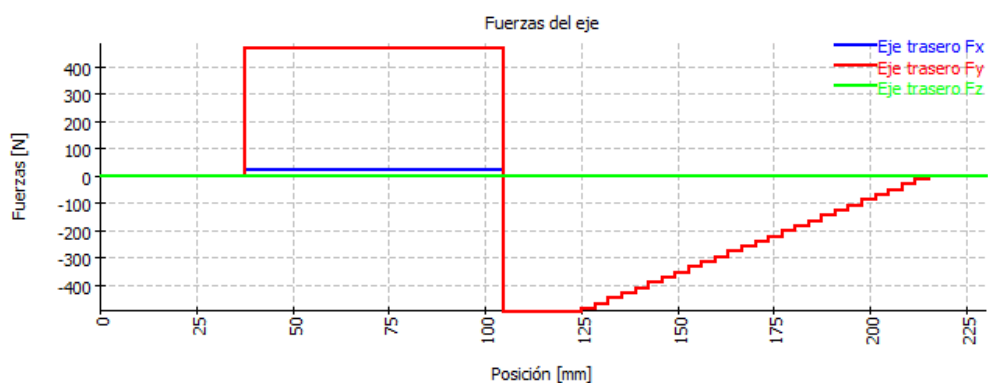


Figura 64: Diagrama de fuerza cortante para el diseño del eje

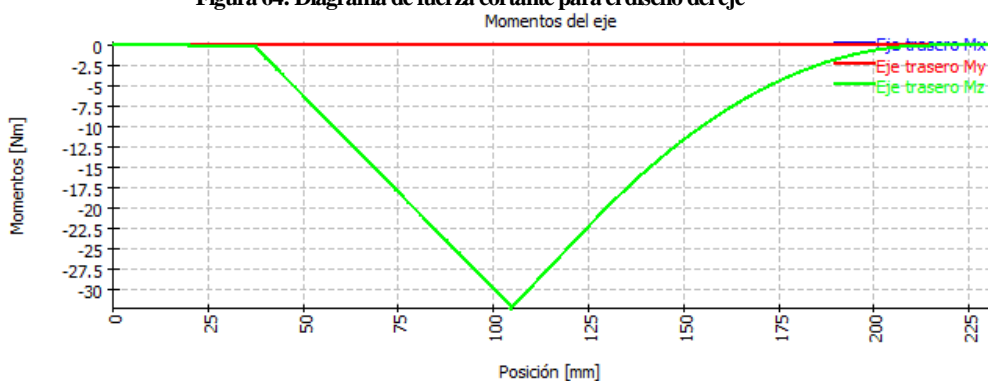


Figura 65: Diagrama de momento flector para el diseño del eje

Para la estimación del diámetro más pequeño, se usará el criterio ED-Goodman (Budynas & Nisbett, 2012) puesto que es simple y conservador. La ecuación (3-39)

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right) \right\}^{1/3} \quad (3-39)$$

Donde: K_f, K_{fs} son las constantes para concentradores de esfuerzos, en el caso de un anillo retenedor como el que se usará, $K_f = 5$ y $K_{fs} = 3$; S_e es el límite modificado de resistencia a la fatiga, para calcularlo se utiliza la ecuación (3-40)

$$S_c = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (3-40)$$

Siendo $K_a, K_b, K_c, K_d, K_e, K_f$ los factores de modificación por condición superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad y efectos varios respectivamente; los valores están tabulados y se pueden encontrar en: (Budynas & Nisbett, 2012). $K_f S'_e$ es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

Se obtiene entonces:

$$S_c = (0,934)(0,9)(0,5)(380) = 159,78 \text{ MPa} \quad (3-41)$$

Reemplazando en la ecuación (3-39) el diámetro con un factor de seguridad $n=1,3$ se obtiene:

$$d = \left\{ \frac{16 * 1,3}{\pi} \left(\frac{2(5 * 33)}{160} + \frac{[3(3 * 500)^2]^{1/2}}{380} \right) \right\}^{1/3} \quad (3-42)$$

$$d = 13,72 \text{ mm} \quad (3-43)$$

De acuerdo a ello se obtiene un diámetro de 13,72 mm como mínimo en los anillos de retención, por cuestión de diseño se usará 14mm, el diámetro para el acople del motor será de 15mm y en la rueda 16mm. El diseño final del eje se muestra en la Figura 66.

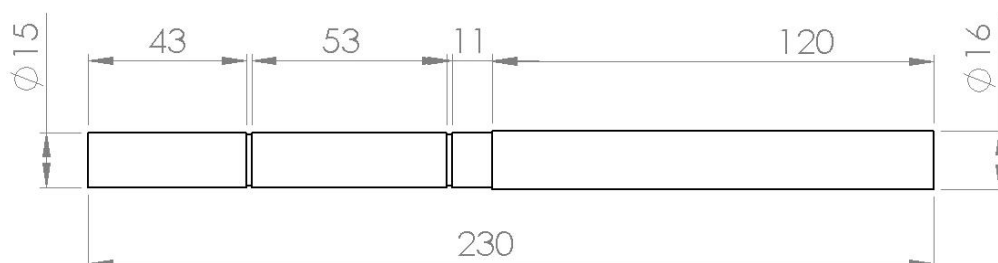


Figura 66: Medidas finales eje.

La Figura 67 muestra una representación tridimensional del eje y los rodamientos, obsérvese el color naranja en los puntos sometidos a mayores esfuerzos.

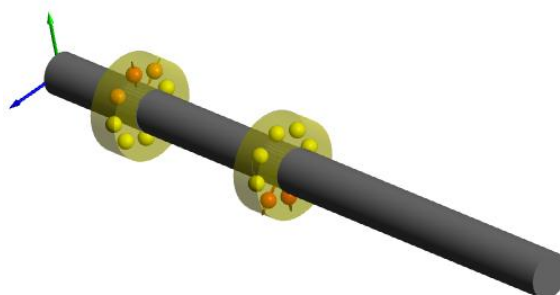


Figura 67: Representación 3D del eje diseñado

Acoples

Contrario a lo que se necesita, las ruedas seleccionadas contienen de fábrica rodamientos a ambos lados, lo que no permite un movimiento de la rueda solidaria al eje. La solución es diseñar una pieza que acople el movimiento del eje y la rueda; por cuestiones estéticas se mantendrá un rodamiento en la parte frontal de la rueda.

La pieza será ajustada a presión en la rueda, pasando a formar parte de la misma y permitiendo un giro solidario entre ambas; la transmisión de movimiento entre el eje y el nuevo acople se dará gracias a un prisionero; la Figura 68 muestra el acople diseñado

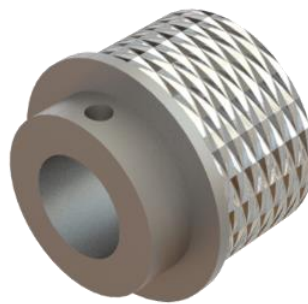


Figura 68: Acople eje-rueda

3.5.3.2. Diseño electrónico

Para el control de los motores, se utiliza un controlador Monster Moto Shield mostrado en la Figura 69; el cual contiene un par de circuitos integrados puente H de potencia VNH2SP30, las características del mismo son:

- Voltaje: máximo 16 V
- Corriente: Máxima 30 A, Nominal 14 A
- Pin disponible para medida de corriente integrado
- PWM con frecuencia máxima de 20 KHz

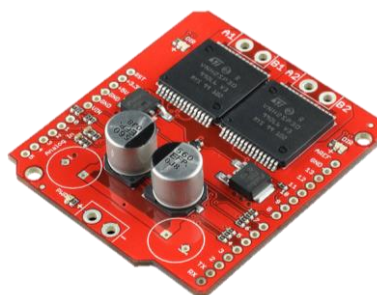


Figura 69: Controlador de motores DC Monster Moto Shield

El controlador es capaz de controlar dos motores, para cada motor se necesita la conexión de 3 pines, 2 determinan el sentido de giro del mismo mientras que el tercero es la entrada de PWM que controla la velocidad y torque del motor. El diagrama de conexión se presenta en la Figura 70 donde los cables verde M1A (pin 4), gris M1B (pin 7) y violeta PWM1 (pin 5) se encargan del control del motor derecho.

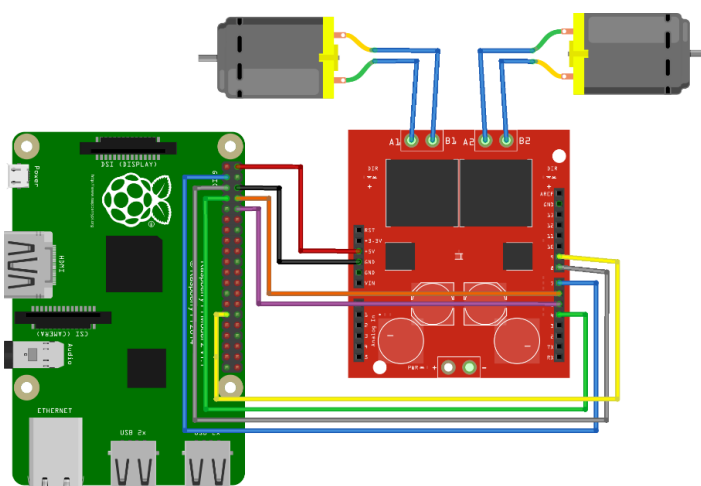


Figura 70: Esquema de conexión del controlador de los motores

3.5.3.3. Sistema de control

El diagrama de flujo muestra el control de la dirección de la plataforma robótica por medio de la interfaz. Una vez energizado el sistema se inicia la interfaz gráfica en ROS la cual espera una señal de movimiento dividiéndola en cuatro: adelante, atrás, izquierda y derecha. Luego se selecciona la dirección por medio de la interfaz y la Raspberry envía una señal digital, la misma que activa el controlador de los motores energizándolos dependiendo de la señal; de esta manera se logra el movimiento en conjunto de los cuatro motores para el movimiento final de la plataforma.

El lazo de control para el sistema se puede entender mediante el diagrama de flujo que expresa la Figura 71.

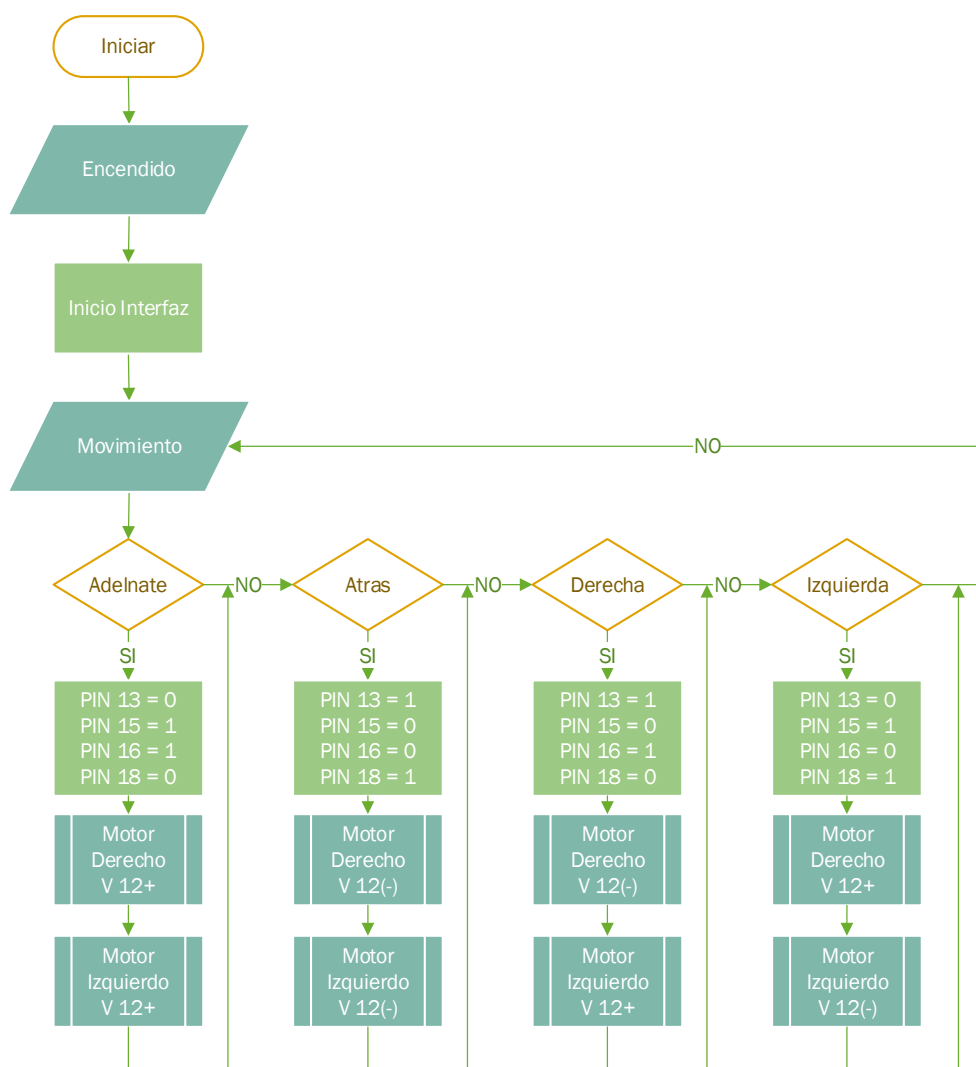


Figura 71: Diagrama de flujo para el control de motores

3.6. Módulo 4. Adquisición y mando

El módulo refiere al sistema embebido encargado de la adquisición y control de los datos provenientes de los diferentes sensores usados. También, debe enviar y recibir información del módulo de teleoperación para realizar las operaciones requeridas.

3.6.1. Alternativas para diseño

Para el módulo se necesita de un hardware que logre soportar la gran cantidad de datos y que por motivos de especificaciones sea de uso libre. Entre las alternativas destacan: a) Raspberry, b) PCduino y c) 3DR Pixhawk.

Raspberry

Es un sistema embebido que integra una computadora completamente funcional de bajo coste que contiene un procesador central y una memoria RAM.

Ventajas

- Bajo costo.
- Alto rendimiento.
- Gran flexibilidad de programación.
- Cuenta con su propio sistema operativo.

Desventajas

- Requiere de hardware adicional para la lectura de algunos sensores.
- Menor cantidad de entradas digitales.

PCduino

Es un sistema embebido que consta con hardware y software libre basada en un microcontrolador AVR alto rendimiento que soporta sistemas operativos como Ubuntu y Android. Se puede programar también en C, C++, Java, Python, Arduino, entre otros lenguajes.

Ventajas

- Gran número de entradas y salidas para diferentes usos.
- Gran capacidad de procesamiento.
- Soporta sistemas operativos.

Desventajas

- Mediana dificultad de programación.
- Costo mediano alto.
- Difícil adquisición.

3DR Pixhawk

Es un sistema embebido totalmente dedicado a la navegación y control de drones, cuenta con varios puertos para la conexión de periféricos.

Ventajas


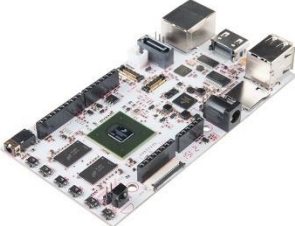

- Tiene 48 pines digitales.
- Bajo costo energético.
- Tiene puertos de conexión GPS, serial y PWM.
- Cuenta con su propio sistema operativo (NuttX).

Desventajas

- Procesamiento reducido.
- Costo elevado.
- Disponibilidad baja.

3.6.2. Evaluación y selección de alternativas

Tabla 39:
Alternativas para el controlador de la plataforma robótica

SOLUCIÓN	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
A Raspberry Pi 2		COSTO*: \$41,95 Procesador Broadcom 900 MHz BCM2836 ARMv7 Quad Core 1 GB RAM 27xGPIO, puerto UART, I2C Sistema operativo: Windows 10, Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux, RISC OS
B PCDuino Acadia		COSTO*: \$119,95 Procesador: Freescale i.MX6 SoC 1.2GHz ARM Cortex A9 Quad Core 1 GB RAM 14xGPIO, 2xPWM, 6xADC, UART, 1xSPI, I2C Sistema operativo: Ubuntu 12.04, Android ICS 4.4
C 3DR Pixhawk		COSTO*: \$199,99 Procesador ARM Cortex M4 32 bits 168 KB RAM 14xPWM, 5xUART, I2C, SPI, 6xADC Sistema operativo: Nuttx RTOS

* Costo estimado en tiendas únicamente dentro de USA

Aplicando el método ordinal corregido de criterios ponderados:

Tabla 40:
Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4

Criterio	Costos	Procesador	Flexibilidad	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Pondera.
Costos	-	5	2,5	2,5	11	0,32
Procesador	0	-	2,5	2,5	6	0,18
Flexibilidad	2,5	2,5	-	0	6	0,18
Disponibilidad	2,5	2,5	5	-	11	0,32
				Σ	34	1,00

Tabla 41:
Ponderación de costos para las alternativas de diseño al módulo 4

Costos	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 42:
Ponderación de velocidad del procesador para las alternativas de diseño al módulo 4

Procesador	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 43:
Ponderación de flexibilidad de operación para las alternativas de diseño al módulo 4

Flexibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Σ	18	

Tabla 44:
Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 4

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pondera.
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	2,5	3,5	0,19
Solución C	0	2,5	-	3,5	0,19
			Σ	18	

Tabla 45: Conclusión en la selección de alternativas de diseño para el módulo 4

	Costos	Procesador	Flexibilidad	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,1977	0,0833	0,0833	0,1977	0,56	56%
Solución B	0,1078	0,0833	0,0833	0,0629	0,34	34%
Solución C	0,0180	0,0098	0,0098	0,0629	0,10	10%
				Σ	1,00	

La solución elegida es entonces la placa de desarrollo Raspberry Pi 2 Model B, sus características se enumeran en la Tabla 46

**Tabla 46:
Características de la placa de desarrollo Raspberry**

Raspberry Pi 2 Model B	
Procesador Principal	Broadcom 900 Mhz ARMv7 Quad Core
Procesador Gráfico	Broadcom VideoCore IV GPU
RAM	1 GB
Puertos USB	4 puertos USB 2.0 hasta 1,2 A
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
Periféricos de bajo nivel	27 pines GPIO, UART, I2C, SPI, +3,3V, +5V, GND
Sistema Operativo	Soporta Windows 10, Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux, RISC OS entre otros

3.6.3. Diseño final

3.6.3.1. Diseño mecánico

Todos los circuitos electrónicos que componen el sistema de control de la plataforma serán ubicados dentro de una caja metálica sellada, sin embargo, para una fácil conexión de periféricos y demás sensores se requiere que los puertos USB de la placa Raspberry estén disponibles en la parte externa de la misma.

Se usó una caja de fuente de computador, ya que cuenta con el espacio suficiente para los circuitos y es de fácil adquisición; además, cuenta con un ventilador que se encargará de disipar el calor que pueden producir los controladores para usados. A partir de allí se diseñó el

soporte para la placa Raspberry mostrado en la Figura 72, de manera que los puertos Ethernet y USB sean accesibles.

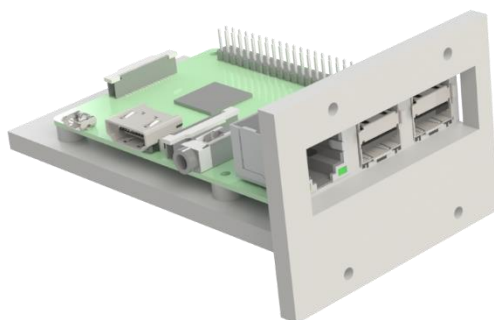


Figura 72: Soporte para la placa Raspberry

Todas las demás placas de circuito estarán colocadas sobre una placa de acrílico para aislar la circuitería de la caja metálica como se puede observar en la Figura 73.

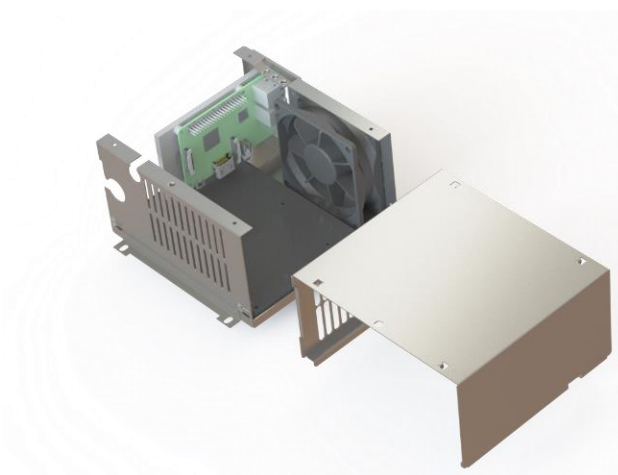


Figura 73: Caja de control

3.6.3.2. Diseño electrónico

Se realiza el diseño electrónico donde se contempla el control, sensores, actuadores y energía de toda la plataforma de exteriores. Como antes ya se decidió, se usa un sistema embebido Raspberry Pi 2 Model B para el control y procesamiento de todos los datos, como sensores se tiene un sensor LIDAR, un receptor GPS y una cámara; como actuador están los motores y como fuente de energía una batería de 12v. Para una mayor información acerca del diseño véase el Anexo F.

Un diagrama de conexión básico se muestra en la Figura 74.

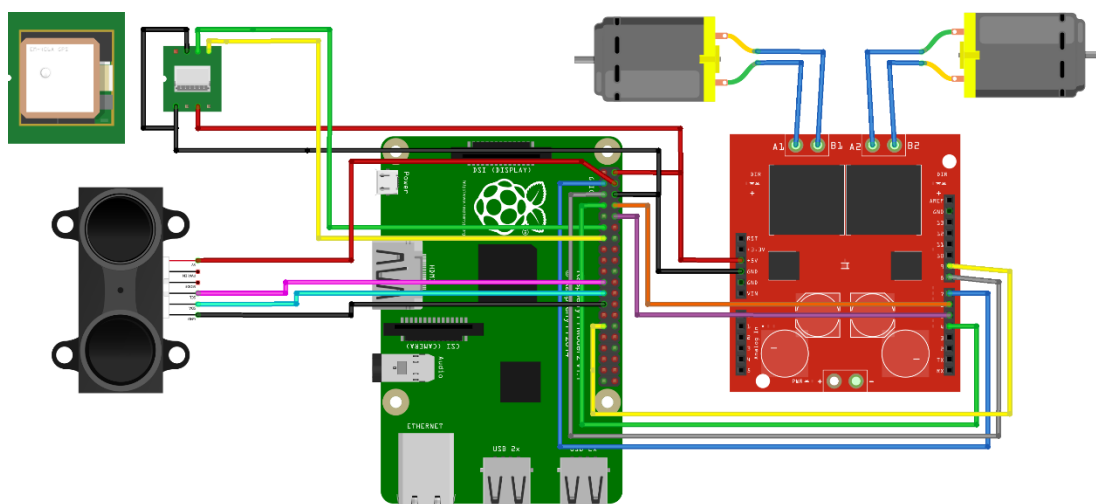


Figura 74: Diagrama de conexión para la caja de control

3.7. Módulo 5. Teleoperación

El modulo es el encargado de la transmisión de datos desde el robot hasta el mando remoto, lo que permite al robot poder interactuar de forma rápida y segura con un operario.

3.7.1. Alternativas para diseño

Entre las alternativas destacan: a) Radiofrecuencia y b) WLAN.

Radiofrecuencia

La radiofrecuencia, una tecnología basada en la transmisión de datos en una frecuencia establecida por medio del espectro de ondas, estas ondas electromagnéticas se pueden transmitir aplicando la corriente alterna originada en un generador a una antena. El espectro electromagnético trabaja entre 3 hercios (Hz) y 300 gigahercios (GHz).

Ventajas

- Gran alcance.
- Varios canales a disposición.
- Fácil adquisición.

Desventajas

- Alto costo.
- Susceptible a interferencias.
- Dificultad de implementación.

WLAN

Es una tecnología inalámbrica utilizada para conectar e intercambiar información entre dispositivos electrónicos que pertenece al conjunto de tecnologías conocidas como Wireless (sin cables), esta tecnología trabaja mediante el envío de paquetes de información y establece la comunicación entre diferentes dispositivos mediante la emisión y recepción de ondas de radio.

Ventajas

- Fácil implementación.
- No presenta interferencias.

Desventajas

- Alcance medio.
- Alto costo.

3.7.2. Evaluación y selección de alternativas

Se elige WLAN. Algunos parámetros decisivos para la selección son:

- Hardware utilizado para la comunicación WLAN es de fácil adquisición y manejo.
- Dada la aplicación del robot para exteriores de localizarse, mapear y video en tiempo real, se necesita un gran intercambio de datos entre la PC y la plataforma.
- La tecnología Wireless permite una comunicación sin cables y logra direccionar los datos enviados a diferentes dispositivos.

3.7.3. Diseño final

La tecnología WLAN tiene una gran velocidad y capacidad de manejo de datos; dentro de esto se usara una VPN (red privada virtual) que permite la extensión de una red pública como Internet a un espacio de red local. Consta de las siguientes características:

- Autenticación y autorización un control constante de quien se conecta y el nivel de acceso del mismo.
- Integridad por medio de esta red no se pierden ni se alteran los datos enviados,
- Confidencialidad usa algoritmos de cifrado que solo pueden acceder los usuarios con permiso de esta red.

- Control de acceso se puede asegurar de los usuarios solo accedan a los datos autorizados.
- Auditoria y registro de actividades para un buen rendimiento y su correcto funcionamiento.
- Alta velocidad de transmisión de datos lo que permite enviar video en tiempo real.

Esta red VPN por medio del servicio de internet permite extender el alcance de teleoperación y esta solamente limitado por la cobertura del proveedor, para su creación se tiene dos opciones:

- La creación y mantenimiento de un servidor privado, el cual proveerá la red VPN dedicada para el proyecto.
- La habilitación de puertos dedicados por medio de las proveedoras del servicio de internet para la realización de la VPN.

Las dos opciones citadas anteriormente se contemplan en el diseño, pero por factibilidad se realiza la teleoperación por medio de un router creando una red WLAN.

3.7.3.1. Topología de la red

La plataforma trabaja bajo una red de área local (LAN), el router se encuentra dentro de la plataforma, a él se conectan la Raspberry mediante un cable Ethernet y el PC vía WiFi, ello simplifica el diseño de la red restringiéndolo únicamente a dos nodos que trabajan bajo las misma red siendo el único requerimiento que ambos sean reconocibles y conozcan la dirección IP del otro nodo. Una representación básica se puede observar en la Figura 75.



Figura 75: Topología de la red WLAN usada en la plataforma

3.8. Definición concepto final

Una de las principales características de la plataforma robótica para exteriores es su construcción modular, lo que permite un fácil armado, mantenimiento y recambio de piezas. En toda la fase de diseño se tomó en cuenta que la plataforma es la base para el desarrollo de nuevos proyectos por lo cual es imprescindible que sea adaptable y escalable; por lo cual no debe tener ningún problema en la adicción de nuevos sensores o aplicaciones.

Anteriormente se observó que todos los módulos constan de un diseño y funciones por separado, de manera que al unir todos los módulos dentro de la plataforma se logre el objetivo final que es el desarrollo de un sistema de ubicación para una plataforma robótica móvil. Aparte de la funcionalidad del proyecto se requiere que sea estético, de manera que en la Figura 76 se muestra el modelo CAD de la plataforma robótica con sus diferentes componentes enumerados en la Tabla 47.

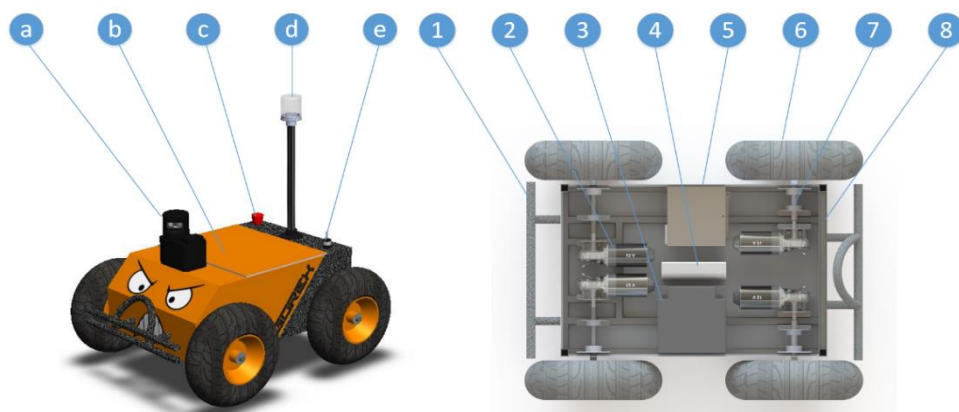


Figura 76: Descripción de componentes

Tabla 47:
Descripción de componentes y módulos

Denominación	Descripción	Módulo
a	Sensor LIDAR	Ubicación
b	Tapa	Estructura
c	Paro de emergencia	Adquisición y mando
d	Cámara	Monitoreo
e	Encendido	Adquisición y mando
1	Bumper	Estructura

Continua →

2	Motor 12V	Estructura
3	Batería 12 V	Adquisición y mando
4	Router	Teleoperación
5	Caja de control	Adquisición y mando
6	Llanta	Estructura
7	Ejes	Estructura
8	Empaque	Estructura

Los procesos realizados se interconectan como me muestra en la Figura 77

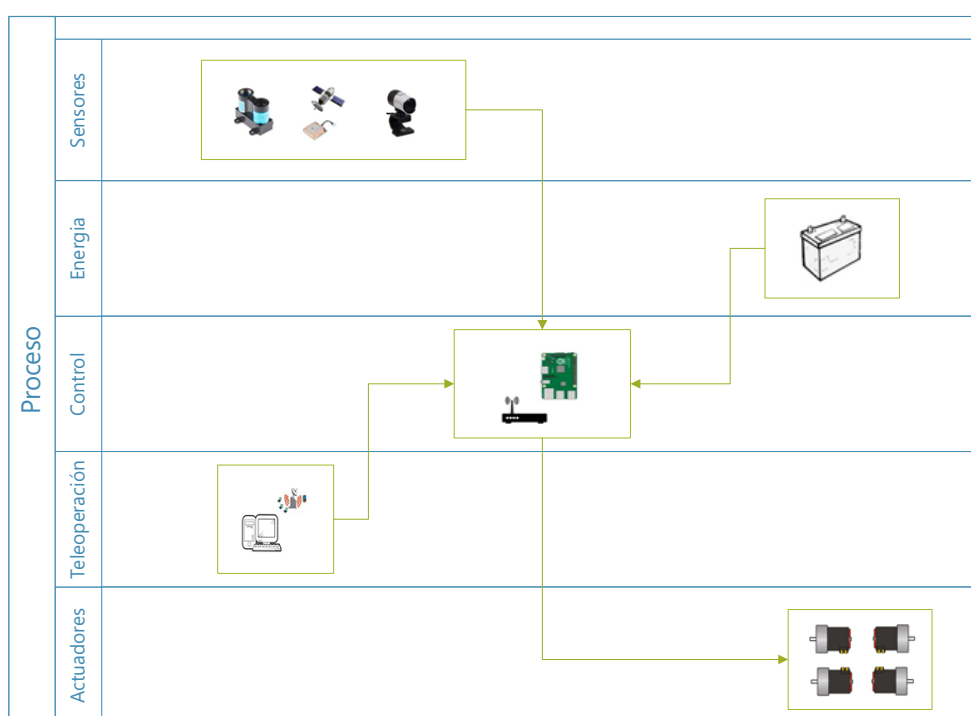


Figura 77: Diagrama de procesos compartidos

3.9. Resumen

- Es importante reconocer las necesidades del usuario y los requerimientos técnicos del proyecto de tal manera que se pueda definir un concepto apto que cumpla con todas las funciones. Los aspectos más importantes para la plataforma robótica son: sistema de ubicación; sistema de monitoreo; estructura resistente, todo terreno e impermeable; sistema de adquisición y mando; sistema de teleoperación, uso de tecnología libre y bajo costo de elementos.
- Los requerimientos establecidos se trasladan a lenguaje técnico de manera detallada; de forma que los requerimientos se transforman en características técnicas que sirven como base para el desarrollo del proyecto; entre las principales se encuentran: diámetros de ruedas, distancias entre ejes, transmisión en tiempo real, alcance de teleoperación, software robótico de acceso libre.
- El análisis de las características técnicas llevado a cabo por medio de la matriz QFD ayuda al desarrollo de una estructura funcional en forma de módulos, estos permiten distribuir de mejor manera las diversas operaciones funcionales dando un orden para cubrir las necesidades de una forma óptima. Los módulos obtenidos son: 1) ubicación, 2) monitoreo, 3) estructura, 4) adquisición y mando y 5) teleoperación, adicionalmente se crearon subsistemas para un mejor desarrollo.
- El método ordinal corregido de criterios ponderados sirve para la selección de soluciones de los módulos anteriormente establecidos. En la Tabla 48 se detallan las soluciones encontradas para cada módulo y subsistema.

Tabla 48:
Tabla de resultados

#	MÓDULO	SUBSISTEMAS	SOLUCIÓN
1	Ubicación	Ubicación global	Sensor GPS EM-506
		Ubicación local	Sensor LIDAR-Lite V2
2	Monitoreo	Cámara a bordo	Cámara Web ANERA
		Interfaz	Software ROS y QT
3	Estructura	Ruedas	Rueda Mintcraft 13"x4"
		Cubierta	Impermeabilizar Sika Bond AT-Metal
4	Adquisición y mando	N/A	Raspberry Pi 2
5	Comunicación	N/A	Tecnología WLAN

- El proceso de diseño final llevado a cabo para cada módulo se divide en tres partes: diseño mecánico, diseño electrónico y sistema de control, se debe tomar en cuenta que no todos los módulos tienen estos tres aspectos. También es importante aclarar que el diseño está limitado al uso de los materiales y herramientas a disposición.

Capítulo 4

Construcción y pruebas

El capítulo detalla el proceso llevado a cabo para la construcción y armado de los elementos físicos, la instalación de los elementos eléctricos y electrónicos que forman parte de la plataforma robótica móvil. También se detalla las pruebas y sus respectivos resultados del funcionamiento del proyecto.

4.1. Sensor LIDAR

La construcción del sensor LIDAR es una parte fundamental del proyecto ya que es el encargado de entregar los datos que serán usados para la ubicación del autómatas; gracias al proceso de diseño, la decisión tomada incurre en un gran ahorro económico, a continuación se detalla paso a paso el proceso de elaboración, ensamble y conexión.

4.1.1. Carcasa y partes impresas

La estructura del sensor está fabricada por impresión 3D bajo el método de Modelado por deposición fundida (FDM) de plástico ABS, la impresión se llevó a cabo en el laboratorio de prototipado de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, gracias al uso de la impresora 3D Makerbot Replicator 2x. La densidad de impresión es de 20% para los componentes internos que se observan en la Figura 78 y de 30 % para los componentes de la carcasa mostrados en la Figura 79; la mayor densidad de los mismos asegura suficiente resistencia e impermeabilidad.

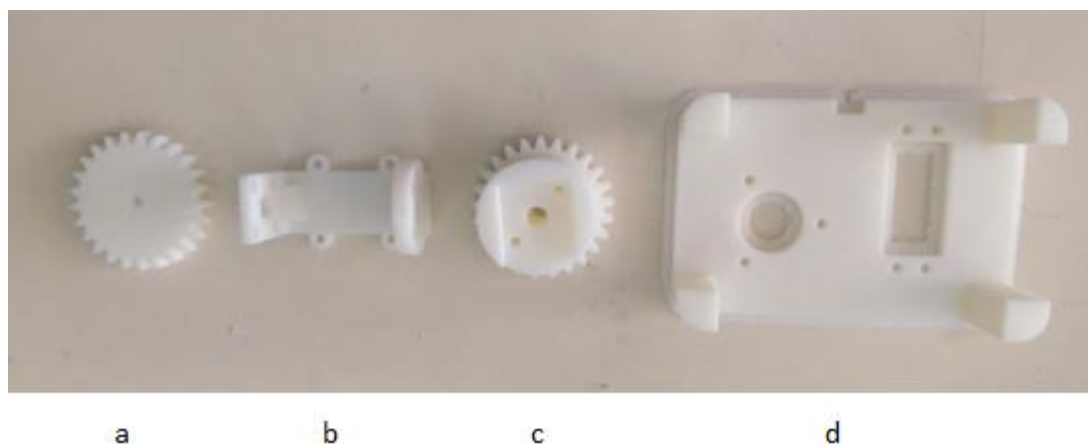


Figura 78: Componentes internos impresos; (a) Engrane del motor, (b) Soporte del sensor LIDAR (c) Engrane del sensor y (d) Estructura interna de anclaje para el motor y el colector

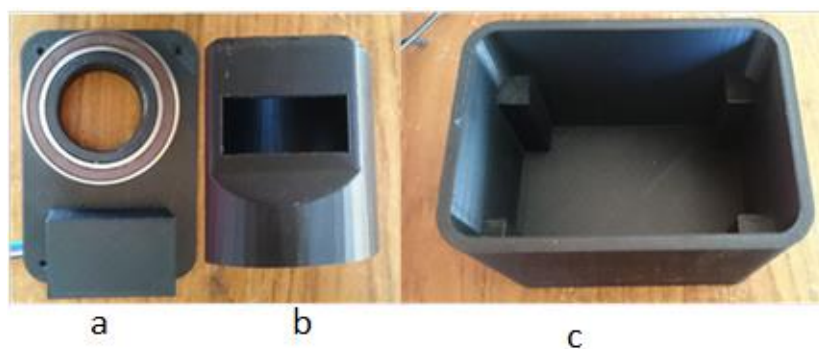


Figura 79: Componentes externos impresos; (a) tapa de la carcasa con rodamiento instalado, (b) cubierta del sensor y (c) carcasa.

4.1.2. Circuitos electrónicos

Las placas de circuitos electrónicos diseñadas en el capítulo 3 fueron impresas sobre pistas de cobre, la elaboración de las PCB (Printed Circuit Board) se realizó en baquelitas con ácido Percloruro de Hierro, posteriormente los elementos electrónicos fueron soldados con estaño. El armado y conexión de las placas se puede observar en la Figura 81 y Figura 80

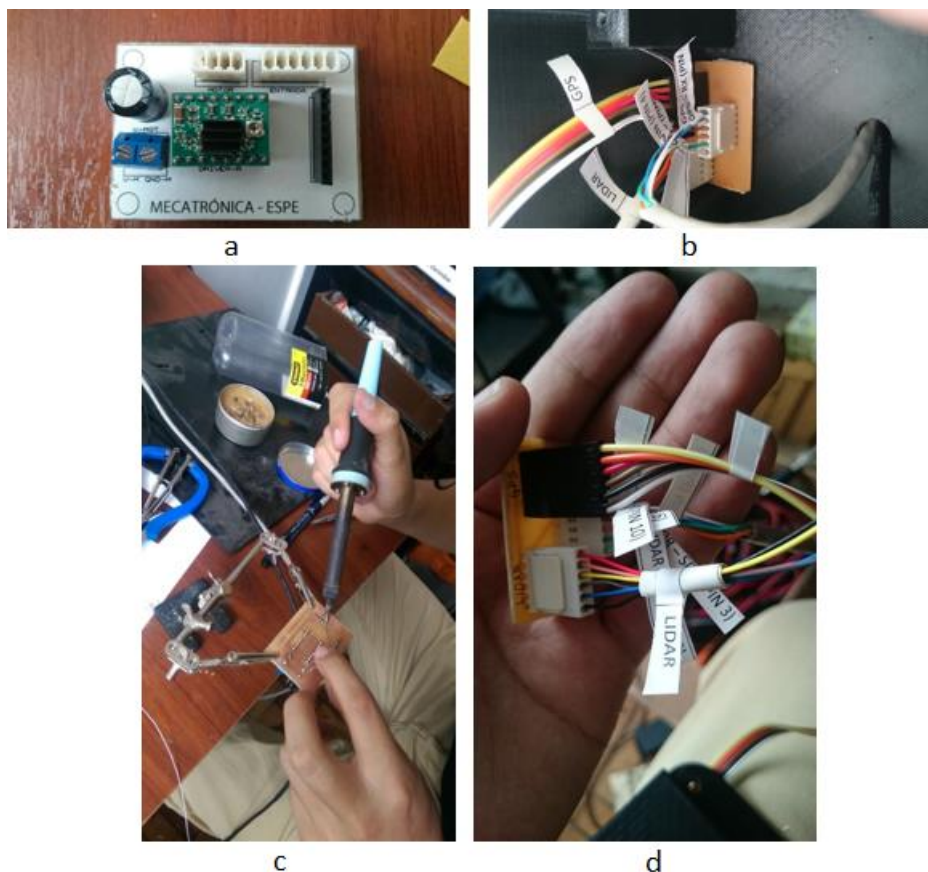


Figura 80: Armado y conexión de las placas de circuito electrónico; (a) placa de conexión, (b) placa Lidar, (c) soldadura y (d) etiquetado de cables.

4.1.3. Ensamble

Fueron necesarios algunos ajustes menores en las piezas impresas debido a la precisión de la impresora. El ensamble se llevó a cabo según lo planificado en la etapa de diseño; para que el equipo sea impermeable y resistente a las condiciones del exterior se incluyeron empaques a medida y silicón. La Figura 81 muestra primero la ubicación del sensor GPS en la tapa de la carcasa, luego el ensamble del sistema de movimiento para el sensor LIDAR y por último, la colocación de todos los elementos de la carcasa.

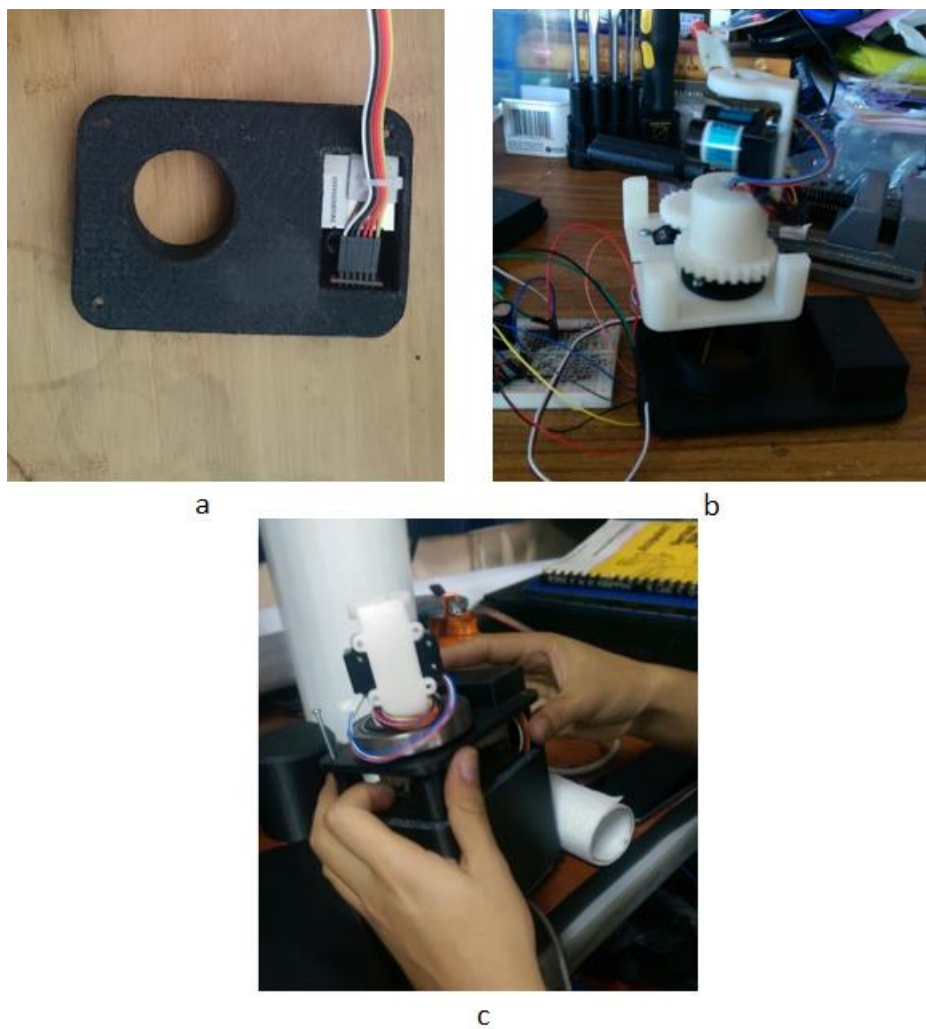


Figura 81: Ensamble del sensor LIDAR; (a) tapa con el sensor GPS, (b) mecanismo interno y (c) ensamble.

4.2. Estructura

La estructura en su totalidad está construida en tubo cuadrado ASTM A36 de 20x20x1.5 mm, y recubierta con planchas laminadas en frío ASTM A366, de un espesor de 0.75 mm; es importante recalcar que toda la estructura está sellada para resistir condiciones adversas.

4.2.1. Maquinado de ejes

Los ejes fueron maquinados en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el material elegido de acuerdo a los cálculos es acero AISI 1018. Los ejes fueron fabricados de manera que pueda acoplarse a la estructura por medio de rodamientos, para ello se utilizó un ajuste de apriete eje-agujero (H7-j6). El maquinado en torno y la colocación se observan en la Figura 82

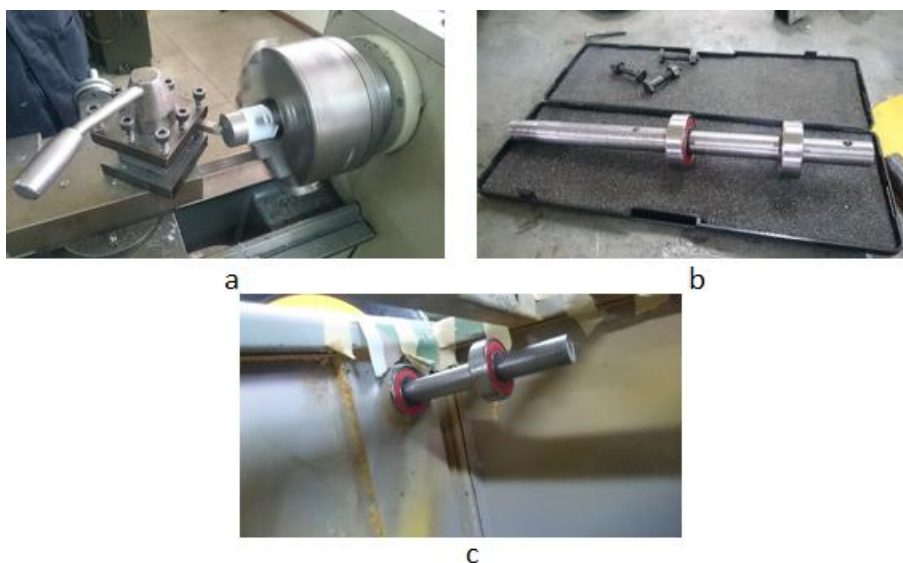


Figura 82: Maquinado y colocación de ejes en la plataforma; (a) maquinado del eje, (b) eje terminado y (c) eje acoplado en la estructura.

4.2.2. Maquinado e incorporación de acoples

Los acoples se fabricaron en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para poder adaptar las nuevas ruedas que necesita la plataforma robótica, el material utilizado fue un acero AISI 1018 por su gran resistencia y fácil maquinado. Los acoples fueron elaborados de manera que tengan un apriete (H8-u8) con las ruedas y para asegurar al eje se realizó una perforación con rosca para una espiga roscada m4. El proceso de construcción y colocación se puede observar con mayor detalle en la Figura 83

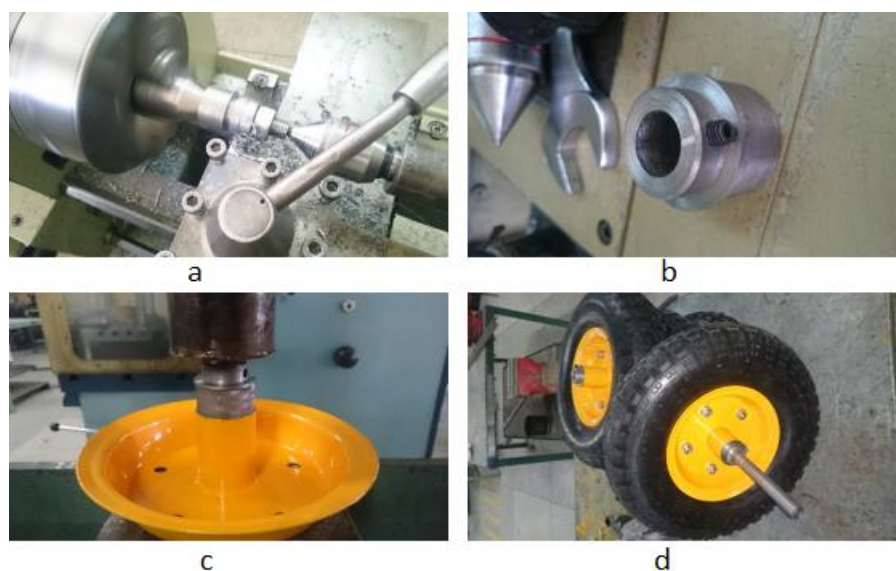


Figura 83: Maquinado y colocación de acoples para las ruedas de la plataforma; (a) maquinado acople, (b) acople terminado, (c) ajuste con la prensa y (d) llanta con el acople y eje.

4.2.3. Adaptación de la estructura

La estructura tuvo cambios mínimos para mejorar la impermeabilidad de la misma, para protegerla de posibles daños por choques con obstáculos se construyó e instaló parachoques delantero y trasero. Estos parachoques se los realizo con un tubo de $\frac{1}{2}$ pulgada de acero, se procedió hacer los siguientes pasos: corte del tubo con las medidas respectivas, doblado con los ángulos adecuados, soldadura y por ultimo instalación. El proceso se ilustra en la Figura 84

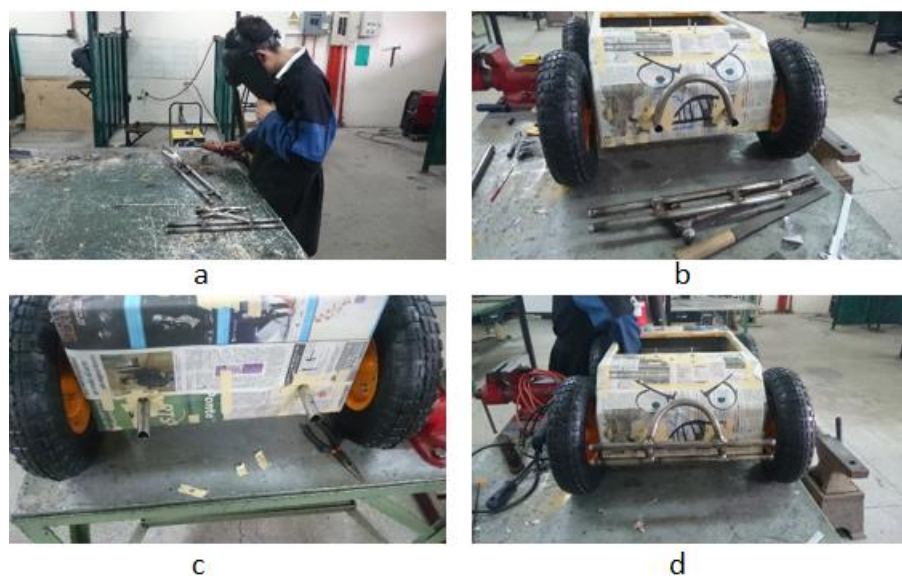


Figura 84: Construcción e instalación de parachoques; (a) soldadura, (b) instalación parachoques delantero, (c) instalación parachoques trasero y (d) parachoques delantero terminado.

4.2.4. Sellado de estructura

Sellar toda la estructura es importante para lograr una impermeabilidad media y resistencia contra el medio en el que se va a desenvolver la plataforma, para ello se utilizó material sellante sobre la estructura tapando así cualquier orificio por el que pueda entrar agua, también se utilizó un empaque hecho a medida para tener un cierre hermético en la parte inferior. La plataforma fue cubierta con anticorrosiva que además de mejorar la estética adiciona protección contra el ambiente. La tapa de la plataforma cuenta con un empaque de goma para evitar el ingreso de agua y polvo. El proceso se puede observar en la Figura 85



Figura 85: Inclusión de material sellante en las juntas de la estructura y pintado de la plataforma; (a) llenado de espacios con Sika-boom, (b) sellado con Sika Bond AT-Metal, (c) recubrimiento pintura anticorrosiva, (d) recubrimiento pintura batapedra, (e) pegado del empaque parte inferior (f) cerrado de la parte inferior.

4.3. Circuitería

Una vez terminada la construcción del sensor y adecuada la estructura para las necesidades del usuario se procede con la disposición de los componentes electrónicos para la operatividad de la plataforma robótica móvil.

4.3.1. Caja de control

La caja de control se construyó a partir de una fuente de computadora, de tal manera que se aprovecha el ventilador ya ensamblando, se tomó en cuenta el tamaño de los circuitos y se dispuso de manera óptima y eficaz sobre una placa de acrílico de 3 mm de espesor, también se fabricó un soporte para la placa Raspberry Pi en la impresora 3D Makerbot Replicator 2x del laboratorio de prototipado dando así una mayor estabilidad y evitando que los circuitos sean afectados por vibraciones o movimientos bruscos de la plataforma. La caja de control, su armado y ubicación dentro de la plataforma se observan en la Figura 86

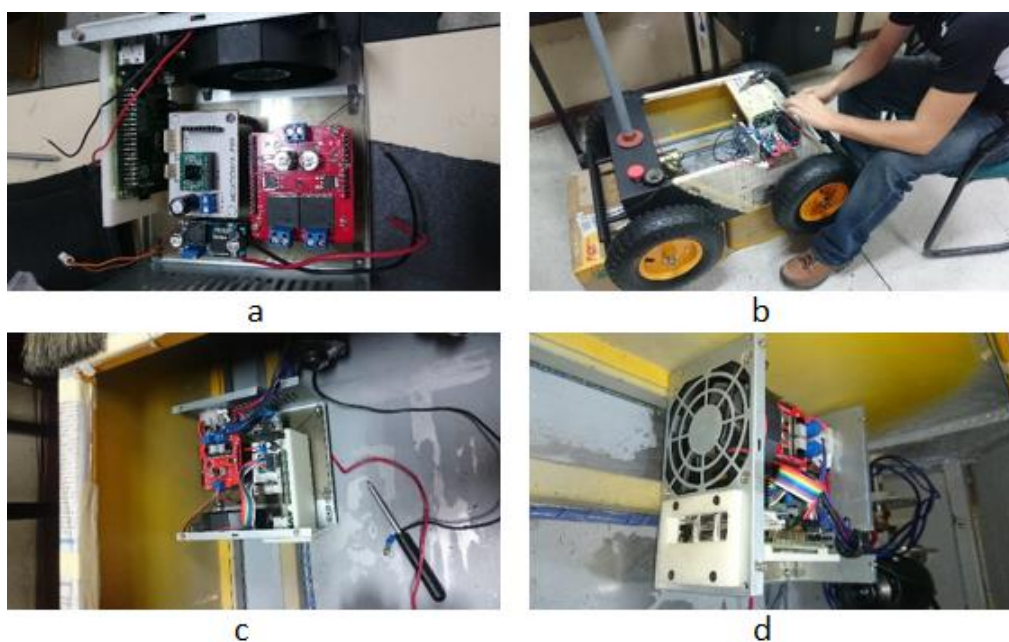


Figura 86: Armado de la caja de control y ubicación de la misma dentro de la plataforma; (a) circuitos de control, (b) armado de la caja de control. (c) instalación de la caja de control y (d) puertos para dispositivos externos de la caja de control y ventilador.

4.3.2. Router y cámara web

Se procedió a la ubicación e instalación de los equipos router y cámara web conectados directamente a la Raspberry por medio de sus puertos de entrada: Puerto de red y USB respectivamente. Ello se muestra en la Figura 87, es importante tomar en cuenta que la cámara se ubicó en un punto más alto para así mejorar el ángulo de visión del operario.

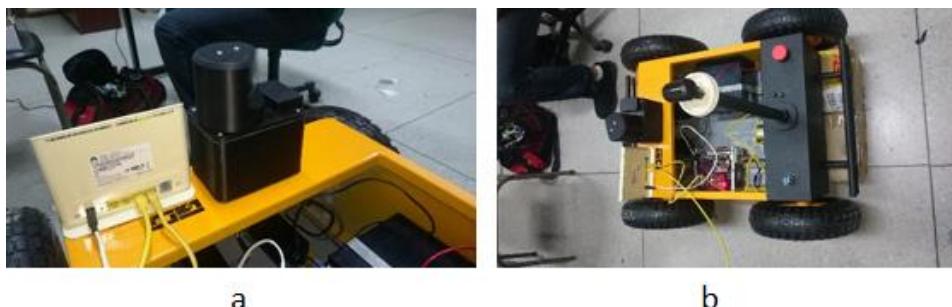


Figura 87: (a) colocación de Router y (b) cámara web en la plataforma

4.3.3. Cableado y protección de seguridad

El cableado es parte importante de la conexión final, de manera que se puede identificar fácilmente cada parte de la plataforma por medio del mismo, se procedió a colocar nomenclatura y usar diferentes colores de cables, evitando así cualquier tipo de confusión. El cableado de la plataforma está cubierto por medio de un espiral de polietileno para cableado del tamaño apropiado y asegurado a la estructura por medio de amarras plásticas para evitar que cualquier movimiento o fuerza pueda desconectarlos.

La seguridad es prioridad en el proyecto; para evitar accidentes o en caso de presentarse alguna falla dentro del sistema, se instaló un botón de paro de emergencia y un interruptor de encendido utilizable únicamente mediante una llave. El cableado y la disposición de botones se observan en la Figura 88.



Figura 88: (a) cableado de los motores en la plataforma y (b) botón de paro de emergencia e interruptor de encendido con llave instalados en la plataforma.

4.4. Software y control

Para el desarrollo del proyecto se realizó un control en la plataforma robótica ROS la cual permite la creación y comunicación entre varios programas, de manera que se puede trabajar modularmente, esto facilita para que el proyecto sea adaptable y escalable uno de los principales requerimientos.

4.4.1. Interfaz Humano-Máquina

El HMI fue desarrollado en el programa QT y fue adaptado a la plataforma ROS por medio de RQT, el proyecto es enfocado a la teleoperación por lo cual un usuario es el encargado del monitoreo de la plataforma. Se diseñó una interfaz amigable y fácil de entender, como se muestra en la Figura 89. Para un mayor entendimiento ver el manual de usuario en el Anexo A.

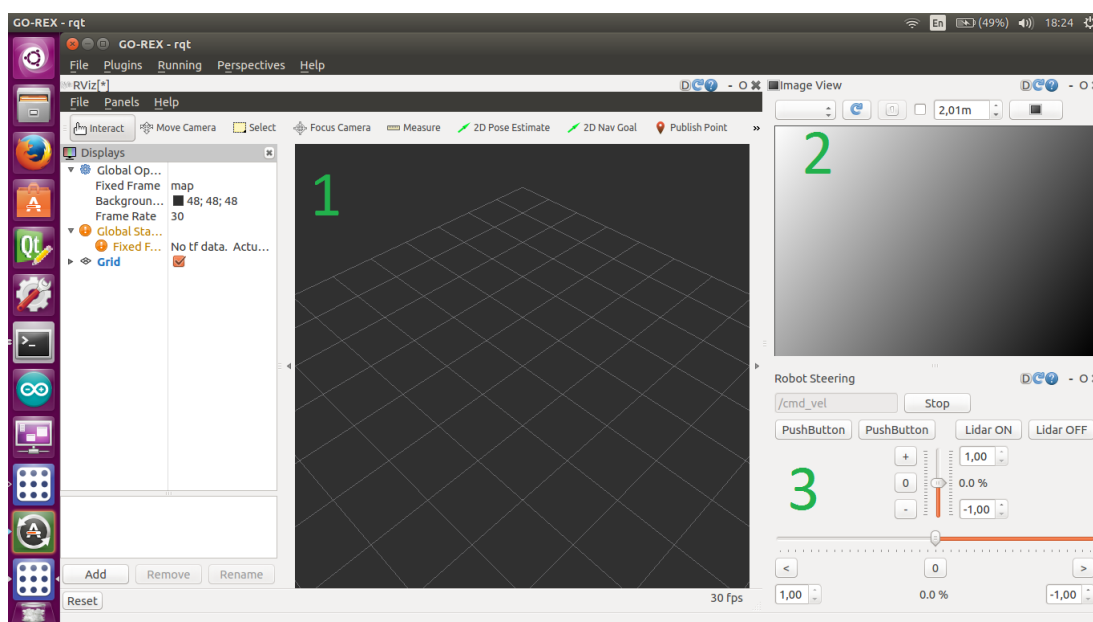


Figura 89: Interfaz Humano-Máquina, la disposición de las ventanas es: (1) Visualización del mapa generado y modelo 3D del la platafrma (2) Imágen de la cámara a bordo y (3) Controles de movimiento del autómeta

La interfaz se creó de manera que se pueda apreciar tres ventanas diferentes cada una cumple una función importante del proyecto:

La primera pantalla es la encargada del manejo del sensor creado; en ella se puede visualizar los puntos del LIDAR y las coordenadas del GPS, de tal manera que se construye un mapa y se indica la orientación del robot dentro del mismo. La ventana también se encarga de la descarga y proyección de un mapa del área en la que se encuentra.

La segunda pantalla es la encargada de la visualización de la imagen captada por la cámara a bordo de la plataforma en tiempo real, en esta se puede visualizar cualquier tipo de imagen y también se puede ver más de una cámara.

La tercera pantalla es la encargada del movimiento de la plataforma y activación de los sensores; esta pantalla además de contar con botones muy claros para el manejo también permite al usuario el manejo por medio del teclado; cuenta con un control de velocidad incremental.

4.4.2. SLAM

Durante el desarrollo se decidió utilizar el paquete Héctor-SLAM de ROS para hacer una mapa 2D SLAM. Dicho paquete es una biblioteca de ROS para la creación de mapas 2D que se puede utilizar sin odometría, debido a que utiliza puntos de referencia de su entorno tomados por el LIDAR para no perder de vista el movimiento en el plano xy. Esto permite usar el sensor construido para publicar el movimiento en el plano X e Y de la plataforma dando la orientación de la misma.

Héctor-SLAM para su correcto funcionamiento necesita un mensaje publicado por el láser con un formato predefinido, necesita una transformada tf , la que brinda información del robot y necesita una señal de control para la creación y configuración del mapa. En la Figura 90 se puede observar el ejemplo de SLAM realizado en el laboratorio de prototipado.

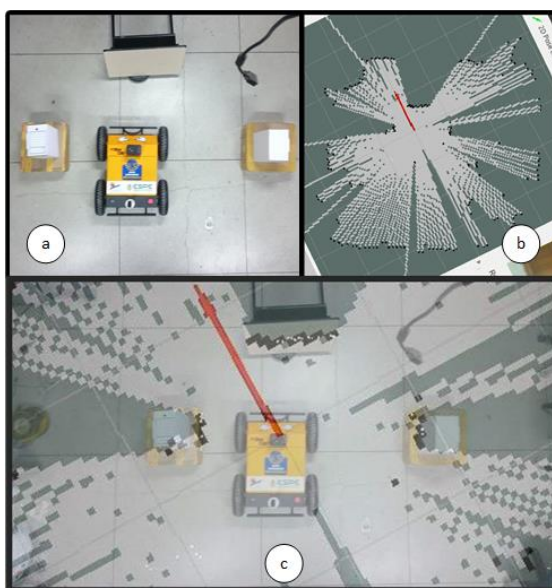


Figura 90: Plataforma realizando SLAM en el Laboratorio de Prototipado (a) vista superior, (b) vista del mapa generado y (c) fusión para comparación del mapa

4.4.3. Sistema de visión artificial

Para el uso de la plataforma, se ha desarrollado una aplicación en base a las siguientes necesidades: a) trasladar la plataforma robótica móvil de manera sencilla, b) transportar herramientas de forma segura sin ningún esfuerzo para el usuario, c) la plataforma debe seguir al usuario automáticamente a una distancia predefinida sin un mando remoto y d) la plataforma debe realizar acciones con un código específico.

Luego de investigar y evaluar varios enfoques, se determinó que la solución más viable es usar la imagen que otorga la cámara a bordo, y usando visión artificial reconocer en tiempo real un conjunto de códigos QR (Quick Response Code), cada uno correspondiente a una acción a realizar.

La aplicación se controla desde dos nodos en ROS, el primero, identifica y reconoce el código QR mostrado ante la cámara y entrega además de la información contenida en el código, la ubicación y el tamaño del mismo en relación a la imagen de la cámara. El segundo nodo, toma los datos del primero y en función de ello, realiza las siguientes funciones:

- Seguimiento del código QR.
- Encendido del Lidar.
- Apagado del Lidar.

Para lograr el seguimiento del código, el programa publica un tópico con las velocidades a seguir por la plataforma de modo que el código QR se mantenga en el centro de la imagen; Para el encendido y apagado del sensor LIDAR, el nodo se encarga de publicar los comandos necesarios que son reconocidos por el nodo encargado del control del sensor.

La aplicación fue desarrollada dejando un código abierto para que en función de futuras necesidades se pueda adaptar y crear.

4.5. Pruebas y resultados

A medida que se avanza en la construcción de la plataforma robótica se evalúa su funcionamiento, de éste modo, se prueban seis etapas que aseguran el correcto desempeño del sistema. La primera comprueba la comunicación de nodos remotos bajo ROS, la segunda el funcionamiento de los componentes instalados en la plataforma, la tercera mide la capacidad de la plataforma para moverse en línea recta, la capacidad para realizar giros sobre distintos

terrenos es evaluada en la cuarta etapa, la quinta etapa se centra en el funcionamiento del sensor LIDAR para realizar SLAM, finalmente, en la sexta etapa se evalúa el funcionamiento de la aplicación.

4.5.1. Primera evaluación

La primera evaluación se realiza luego de haber creado la red WLAN e instalado el sistema operativo para robots (ROS) tanto en la placa Raspberry como en la PC desde donde se controla a la plataforma. El objetivo es comprobar el funcionamiento de los nodos programados en ROS, así como la publicación y lectura de tópicos entre las dos máquinas por medio de la red; así mismo, se mide el ancho de banda usado en el intercambio de información y el procesamiento necesario en los dos procesadores.

4.5.1.1. Resultados

Ambos procesadores son capaces de reconocer la red WLAN y conectarse a la misma, se inicia entonces el servidor maestro ROS en el controlador del robot así como cada uno de los nodos a ejecutar; el PC es entonces capaz de detectar al servidor maestro sobre la red y se ejecutan los nodos correspondientes. La evaluación indica que el ancho de banda ocupado es de aproximadamente 5,6 MB/s siendo el tópico correspondiente a la imagen de la cámara el más crítico con un ancho de banda de 4,72 MB/s, se intentó realizar una compresión de la imagen de la cámara para disminuir el ancho de banda usado, sin embargo, la capacidad de procesamiento de la placa Raspberry fue insuficiente. La ejecución de todos los nodos ocupa un procesamiento de entre 60% y 75% en el controlador del robot (Raspberry) y 15% en el PC. El uso de procesamiento, memoria y red se puede visualizar en la Figura 91. Los nodos y tópicos usados por el robot y el controlador remoto se pueden apreciar en el Anexo G.



Figura 91: Uso de procesador, memoria y red en el computador remoto

4.5.2. Segunda evaluación

Una vez instalados los motores, controladores, batería y el router en la plataforma, se evalúa el funcionamiento de los motores acoplados a los nuevos neumáticos y bajo el nuevo controlador; en ésta etapa se evalúa también la autonomía que tendrá la plataforma; la misma dependerá del consumo de los componentes eléctricos y electrónicos. Para ello cada cierto intervalo de tiempo se toma medidas de la tensión y corriente entregadas por la batería.

4.5.2.1. Resultados

Al realizar la evaluación se observa que al iniciar el movimiento, la aceleración de los motores es demasiado alta, generando saltos al momento de iniciar el movimiento. La solución a éste problema es implementar un control PWM (Modulación por ancho de pulsos) al control de los motores, lo que permite variar la velocidad de movimiento de los motores; para de ésta manera generar una rampa de aceleración y permitir a la plataforma desplazarse a distintas velocidades; También es necesario un cambio en la HMI donde se agregan sliders permitiendo al operario variar la velocidad de movimiento.

Se comprueba que no existen retardos entre la lectura del control en la HMI, la publicación del tópico, la lectura del mismo y el movimiento de los motores.

Los datos recogidos sobre la autonomía del sistema se muestran en la Tabla 49, teniendo finalmente una autonomía de 2 horas, debido a que la plataforma es incapaz de funcionar con tensiones bajo los 10 Voltios. La tabla Tabla 50 muestra los valores recogidos ante y después del uso con la carga desconectada.

Tabla 49:
Tensión en la batería mientras se utiliza la plataforma

Tiempo [min]	Voltaje [V] con carga
0	12.65
10	12.61
20	12.59
30	12.52
40	12.49
50	12.46
60	12.40

Tabla 50:
Tensión en la batería antes y después del uso de la plataforma

Tiempo [min]	Voltaje [V] sin carga
0	14.50
60	12.60

4.5.3. Tercera evaluación

La tercera evaluación mide el desempeño de la plataforma para moverse sobre una trayectoria rectilínea sobre distintos terrenos; así como la tasa de PWM necesaria para iniciar el movimiento. También se evaluó la capacidad de subir pendientes y de atravesar obstáculos incluyendo una grada de 150 mm de altura.

4.5.3.1. Resultados

La evaluación inicial mostrada en la Tabla 51 detalla un recorrido de 10 metros de distancia en línea recta en diferentes terrenos, la desviación que sufre el carro desde su centro de masa y el PWM mínimo usado para que inicie el movimiento. La elección de los terrenos donde las pruebas fueron realizadas se basa en los lugares donde la plataforma trabajará; al pertenecer al Laboratorio de Manufactura, sus desplazamientos los realizará mayoritariamente dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, encontrando los tipos de terreno mostrados en la Tabla 51.

Tabla 51:
Resultados de la prueba de funcionamiento de la plataforma en trayectoria rectilínea

Recorrido 10m	PWM %	Desviación [cm]
Concreto calcáreo liso	10	92
Concreto	20	124
Adoquín	20	103
Césped	40	118

Nota: El porcentaje de PWM indica el ciclo de trabajo mínimo en la modulación por ancho de pulsos que es necesaria para romper la inercia e iniciar el movimiento de la plataforma, la desviación se mide desde la línea recta por la que debería transitar el robot en condiciones ideales.

Después de realizar pruebas sobre los diferentes terrenos se comprueba que la plataforma es capaz de realizar una trayectoria recta en cualquiera de los mismos; por medio de los datos obtenidos de desviación se realizó un ajuste del PWM, de tal manera que se trate de igualar la velocidad de las llantas y el resultado obtenido se lo puede apreciar en la Tabla 52

La plataforma logró mejorar la desviación inicial, pero no se logró reducirla a cero por lo cual se debe tomar en cuenta las condiciones de cada terreno para un ajuste más preciso del PWM. Finalmente, se comprobó que la plataforma es capaz de sortear distintos obstáculos logrando incluso subir por una grada de hasta 150 mm sin mayores complicaciones; ello se puede observar en el link: <https://youtu.be/d1uaekcpC4E>.

Tabla 52:
Resultados en trayectoria rectilínea luego de ajustar el valor del PWM

Recorrido 10m	Desviación [cm]
Concreto calcáreo liso	52
Concreto	61
Adoquín	38
Césped	79

4.5.4. Cuarta evaluación

Las características operativas del mecanismo de desplazamiento por deslizamiento (skid steer) usado en la plataforma son evaluadas de forma crítica al realizar con la plataforma un giro sobre su propio eje en distintos terrenos, del mismo modo, se mide la tasa PWM necesaria para el giro.

4.5.4.1. Resultados

La evaluación realizada muestra que la plataforma presenta problemas al realizar giros sobre ciertos terrenos donde los neumáticos tienden a patinar, sobre todo si las cuatro ruedas no están completamente sobre el piso. El problema se debe a dos factores principalmente: el agarre de los neumáticos utilizados no es suficiente en ciertos terrenos y no se consideró un sistema de suspensión que permita mantener las cuatro ruedas siempre en contacto con el piso. La Tabla 53 muestra el PWM necesario para realizar un giro sobre distintos terrenos.

Tabla 53:
Resultados para la prueba de giro de la plataforma sobre distintos terrenos

Terreno	Giro	PWM [%]
Concreto calcáreo liso	Si	40
Concreto	Si	90
Adoquín	No	-
Césped	Si	100

Como resultado se obtuvo que la plataforma tiene algunas complicaciones al momento de girar dependiendo del terreno, este resultado es debido a la potencia de los motores usados, pero de manera general el giro está condicionado por el terreno.

4.5.5. Quinta evaluación

La quinta evaluación se realiza una vez comprobada la movilidad de la plataforma y luego de instalar el sensor LIDAR construido. El objetivo de la misma es comprobar el funcionamiento del sensor, la capacidad de construcción de mapas y la precisión con la que el robot se ubica dentro del mapa creado. Para ello, se ubica al robot dentro de un entorno cerrado y se pone en marcha el sistema SLAM.

También se evalúa la precisión con la que se ubica el robot en un entorno abierto gracias al receptor GPS que realiza la estimación de los movimientos realizados por la plataforma para determinar su trayectoria.

4.5.5.1. Resultados

La evaluación realizada determina que el sensor funciona correctamente aunque, por sus características se encuentran varias limitaciones:

- La cantidad de puntos obtenidos por vuelta (200) hace difícil la generación de un mapa en entornos abiertos debido al gran ángulo de incertidumbre entre los mismos.
- La velocidad de transferencia de datos del sensor (60 Hz) no permite una estimación rápida del movimiento, lo que dificulta la generación del mapa mientras la plataforma está en movimiento
- La distancia máxima que el sensor puede medir dificulta la localización en entornos abiertos debido a que no se halla una cantidad suficiente de obstáculos respecto a los cuales se pueda conocer la ubicación.

Trabajar en un entorno cerrado o cerca de una cantidad suficiente de obstáculos mejora el funcionamiento del sistema siendo la limitación más crítica la velocidad a la que se puede mover la plataforma; para minimizar éste inconveniente, los valores de frecuencia de actualización del mapa y de movimiento mínimo necesario para la regeneración del mismo se fueron cambiando hasta lograr generar mapas bastante cercanos a la realidad, así como una

ubicación del robot dentro de los mismos muy cercana al punto en el que el robot se encuentra. La evaluación de precisión del sensor LIDAR se detalla en la Tabla 54 con un obstáculo a distancia regulable.

Tabla 54:
Mediciones del sensor LIDAR con obstáculos a distancias reguladas

Lidar	Distancia mm	Diferencia	Porcentaje %
632	500	132	26,4
1093	1000	93	9,3
1623	1500	123	8,2
2131	2000	131	6,5
2634	2500	134	5,3

Los resultados obtenidos no son los deseados, después de analizarlos se observa que se mantiene un error u offset de 130 mm, la solución es realizar en software una resta de dicho valor a los datos provenientes del LIDAR.

Tabla 55:
Mediciones corregidas por software del sensor LIDAR con obstáculos a distancias reguladas

Lidar	Distancia mm	Diferencia	Porcentaje %
501	500	1	0,2
999	1000	-1	-0,1
1505	1500	5	0,33
2008	2000	8	0,4
2509	2500	9	0,36

Los errores obtenidos, mostrados en la Tabla 55; oscilan entre 1 y 10 milímetros, rango totalmente aceptable para la aplicación requerida; se comprueba entonces el correcto funcionamiento del sensor.

Se evalúa entonces la capacidad de creación de mapas y de ubicación del robot dentro de los mismos. Se coloca a la plataforma en un entorno cerrado y se procede a navegar por el mismo mientras se ejecuta el sistema SLAM. La Figura 92 muestra el mapa creado por la plataforma al finalizar el trayecto.



Figura 92: Plataforma realizando SLAM mientras navega por un entorno cerrado

Se concluye la evaluación de forma satisfactoria al determinar que la plataforma es capaz de construir mapas mientras navega por entornos desconocidos y de conocer su ubicación y orientación dentro de los mismos.

4.5.6. Sexta evaluación

La sexta evaluación es realizada al finalizar la programación del sistema de visión artificial de la plataforma, el objetivo es evaluar la funcionalidad y facilidad de uso de la misma, así como detectar posibles inconvenientes en el seguimiento de la marca QR. Se evaluaron dos fases: reconocimiento del código QR y seguimiento del mismo.

4.5.6.1. Resultados

Al finalizar la primera fase de la evaluación, se determina que el nodo de reconocimiento del código QR funciona a la perfección. El código QR es reconocido y el sensor LIDAR inicia su funcionamiento de inmediato. Los códigos QR usados se muestran en la Figura 93.

La segunda fase en cambio, presenta ciertos problemas al momento de realizar el seguimiento cuando la marca se mueve demasiado rápido, ello era de esperarse debido a la baja capacidad de procesamiento del controlador y la baja resolución de la cámara utilizada. Sin embargo, luego de ciertos ajustes se comprueba que la plataforma cumple con el objetivo.



Figura 93: Códigos QR usados para el control de la plataforma, (a) código para el seguimiento (b) inicia el funcionamiento del sensor LIDAR y (c) detiene el funcionamiento del sensor LIDAR

4.5.7. Especificaciones técnicas de la plataforma

Tamaño y peso	
Dimensiones externas (l x w x h)	810 x 660 x 410 mm
Dimensiones internas	300 x 380 x 90 mm
Peso	30 kg
Ruedas	165 mm
Altura del chasis	100 mm
Velocidad y rendimiento	
Carga útil	20 kg
Velocidad máxima	0.7 m/s
Transmisión / accionamiento	4x4
Angulo máximo de ascenso	25
Batería	
Batería	Batería de plomo-ácido
Capacidad	12 V, 24 Ah
Duración - STANDBY	8 horas
Duración – uso nominal	2 horas
Tiempo de carga	6 horas
Interfaz y comunicación	
Formas de control	Centro de mando teleoperado,
Comunicación	Wi-Fi (20 dbm)
LIDAR	Lite V2 200 pulses/s
DRIVERS AND APIs	ROS, C++, and Python.
Entorno	
Temperatura de funcionamiento	0 °C hasta 40 °C
Condiciones climáticas	Lluvia tenue, soleado, nublado.

4.6. Resumen

- La construcción de la plataforma robótica móvil de exteriores es desarrollada en varias etapas. Primero, se construye el sensor que es la base del sistema de ubicación. Segundo, se adapta la estructura para las nuevas necesidades del proyecto. Luego, realiza la instalación de todos los componentes en la estructura. Después, se conectan todos los componentes electrónicos. Finalmente se realiza el control del robot móvil.
- Las pruebas de funcionamiento del robot se realizan en seis etapas. La primera se realiza con funcionamiento adecuado de los nodos para el envío y recepción de datos entre la Raspberry y el PC. La segunda evalúa la autonomía de plataforma robótica. La tercera evaluación interpreta el control del robot teleoperado para realizar una trayectoria en línea recta. La cuarta evaluación registra el desempeño del robot para girar sobre su propio eje. La quinta evaluación monitorea el correcto funcionamiento del sensor y el sistema de localización y mapeo simultáneos. Y por último la sexta evaluación registra el desempeño de la plataforma robótica y su sistema de visión artificial para el reconocimiento de códigos QR.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

El capítulo expone las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido a partir del trabajo realizado. También, se abordan las 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 un sistema de ubicación para la plataforma robótica de exteriores teleoperada de dimensiones 810x660x410 mm, con un peso de 30 kg y una carga útil de 20 kg. Además se basa principalmente en el uso de un LIDAR y un GPS, este sistema permite al usuario tener un pleno conocimiento del lugar exacto en el que se encuentra la plataforma y así poder operarlo adecuadamente. Adicionalmente, la plataforma es operada mediante un mando remoto capaz de recibir los datos de los sensores y la imagen en tiempo real de la cámara a bordo. También, a partir de los datos obtenidos crea un mapa 2D de la zona. Finalmente, el control del robot móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS).
- Mediante investigación, análisis y recopilación de diferentes aportes sobre el tema del SLAM, se logró diseñar y construir un sensor a medida capaz de tomar datos en dos dimensiones. El sensor construido es apto para mapeo y uso en exteriores con un ángulo de operación de 360°; posee una resolución de 1,8°, y detecta obstáculos a una distancia máxima de 24 metros. La fabricación del mismo se realizó en su totalidad en plástico ABS mediante impresión 3D. Por último, la investigación desarrollada e implementada representa un gran adelanto en los últimos logros a nivel nacional y un alto ahorro económico dentro del proyecto.
- Partiendo del análisis de diferentes sistemas de ubicación y navegación en robots móviles se utiliza el paquete Héctor-SLAM de ROS para realizar el mapeo; el nodo toma como datos de entrada el mensaje del sensor LIDAR y las matrices transformadas que representan al robot. La implementación del paquete permite al robot móvil crear un mapa consistente de manera incremental a medida que

avanza por un entorno desconocido; también entrega la ubicación y orientación del robot dentro del mismo.

- Se diseñó y maquinó ejes y acoples para incorporar las nuevas llantas de 33 cm a la estructura. Gracias a dicho cambio, el robot es ahora capaz de subir una grada de hasta 150 mm. Luego, se realizó el sellado con Sika Bond AT-Metal obteniendo un grado medio de impermeabilidad y se instaló la caja de control dentro de la plataforma. Adicionalmente, se adaptó la cámara web y el sensor con su respectiva protección. Por último, se construyó parachoques delanteros y traseros para evitar que obstáculos grandes o colisiones puedan dañar al robot.
- El control de la plataforma lo realiza en su totalidad un sistema embebido (Raspberry Pi 2 Model B). Todos los controladores electrónicos se ubican en una caja metálica. Los componentes utilizados son: 2 Shield Monster Driver – Puente H de potencia con capacidad de controlar dos motores mediante modulación de PWM, un DSN 5000 regulador de voltaje hasta 24 V, una placa PBC realizada para el acondicionamiento del sensor LIDAR, un ventilador, un router, una cámara web y una batería 12 V.
- El control de la plataforma robótica móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS) involucra el desarrollo de siete nodos principales. Los nodos de LIDAR, GPS y cámara web envían los datos desde el robot. El nodo de control de motores comanda los actuadores que sirven para el desplazamiento. Los nodos de operación remota, SLAM se encargan de la teleoperación y sistema de ubicación. Además, un nodo extra permite usar al GPS como señal de odometría en exteriores. Dos nodos adicionales se encargan del reconocimiento y seguimiento de códigos QR.
- La evaluación del funcionamiento de la plataforma en cada etapa de desarrollo ha permitido determinar que el mecanismo utilizado para su locomoción es adecuado para la operación del robot, sin embargo, se presentan ciertas dificultades sobre algunos terrenos debidas al bajo torque que entregan los motores utilizados. Del sistema de control se destaca la ausencia de retardos en la comunicación con el sistema de operación remota. Además, el robot es ahora capaz de generar mapas del entorno con el que interactúa conociendo su ubicación dentro del mismo en todo momento.

- La plataforma es ahora capaz de realizar acciones predefinidas por medio de un comando visual, la cámara a bordo capta un código QR y por medio de visión se realiza una función diferente entre las cuales están: iniciar el proceso del Lidar, finalizar el sensor Lidar y realizar seguimiento para facilidad de uso. Esta aplicación se pensó de tal manera que sea abierta dando la facilidad al usuario de programar cualquier acción necesaria.
- Finalmente, se concluye que el proyecto ha permitido generar conocimiento sobre la robótica móvil, SLAM, visión artificial, entre otros. Por tal motivo, es importante realizar la publicación de un artículo científico sobre los detalles diseño, construcción, evaluación y puesta en marcha del presente trabajo. Es un gran avance para el desarrollo tecnológico a nivel nacional e internacional limitado simplemente por el ámbito económico, el proyecto tiene una gran apertura para una tercera etapa.

5.2. Recomendaciones

- El diseño modular de la plataforma la hace totalmente adaptable y escalable, permitiendo desarrollar nuevos módulos que se conectan fácilmente al sistema de control para variar o mejorar su funcionamiento. La inclusión de unidades inerciales de medida, por ejemplo, permitirían fusionar datos y obtener la orientación del robot en los tres ejes coordenados de forma precisa
- El sensor LIDAR de bajo costo construido, como es de esperarse, tiene capacidades reducidas; sin embargo, es un interesante punto de partida para entender el funcionamiento del sistema SLAM. El uso de un sensor de mejores características mejoraría sobre manera el rendimiento del sistema de ubicación desarrollado; aumentando la rapidez en la generación de mapas así como la resolución de los mismos.
- La inclusión de la cámara a bordo permite además de la operación remota, el desarrollo de algoritmos de visión por computador. Sistemas de percepción de obstáculos, mapeo en tres dimensiones, odometría visual y reconocimiento de marcas son algunos trabajos que pueden ser desarrollados para hacer más robusto al autómata.

- El sistema embebido encargado del control de la plataforma presenta un gran rendimiento y excede por poco las características operativas necesarias para el funcionamiento de la plataforma; sin embargo, para el desarrollo de nuevos trabajos se hace necesario mejorar las capacidades de procesamiento del mismo. El cambio de la placa Raspberry por un computador de altas prestaciones permitiría el desarrollo de aplicaciones más avanzadas con algoritmos complejos o que requieran capacidades superiores de procesamiento.
- La operación de la plataforma desde una estación fija se limita al alcance de la red WLAN creada. En futuros trabajos se podría incluir la creación de una red privada virtual VPN y dotar a la plataforma de internet, así, la operación remota se expandiría al alcance del operador de red elegido. Se recomienda la investigación y desarrollo de otro tipo de conexión inalámbrica que permita la operación segura a grandes distancias.
- El sistema de locomoción presenta dificultades al trabajar sobre ciertos terrenos, principalmente al momento de realizar giros debido al bajo torque que entregan los motores. El cambio de motores y sistemas de transmisión mejoraría las condiciones de trabajo de la plataforma. Trabajos futuros podrían investigar también la viabilidad de un sistema de suspensión para asegurar que las cuatro ruedas estén siempre en contacto con el suelo.

Bibliografía

- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc. Graw Hill.
- Carcanague, S. (2013). *Low-cost GPS/GLONASS Precise Positioning Algorithm in Constrained Environment*. Toulouse: Université de Toulouse.
- Dickmanns, E. (2011). *Dynamic Vision as a Key Element for Artificial General Intelligence*.
Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=YZ6nPhUG2i0>
- Globalsat Technology Corporation. (10 de Agosto de 2013). Globalsat GPS Module; Hardware Datasheet, Product No. EM-506. GlobalSat Worldcom Group. Obtenido de www.globalsat.com.tw
- 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.
- Harrap, R., & Lato, M. (06 de Enero de 2010). *Norwegian Geotechnical Institute*. Recuperado el 19 de Octubre de 2015, de <http://www.ngi.no/upload/48594/1%20What%20Is%20Lidar.pdf>
- Leon Vasquez, I. A., & Vasquez Tapia, A. J. (2013). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN ROBOT MOVIL AUTONOMO Y TELEOPERADO PARA LABORES AGRICOLAS*. Sangolqui.
- Levi, P., & Loeffler, T. (1987). *The use of assembly graphs for robot programming*. Berlin: Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, W. Germany.
- Liadsky, J. (24 de Mayo de 2007). *Naval Postgraduate School*. Recuperado el 19 de Octubre de 2015, de <http://www.nps.edu/Academics/Centers/RSC/documents/IntroductiontoLIDAR.pdf>
- Magdaleno Mas, F., & Martínez Romero, R. (2006). *Consejería Técnica de Estudios Ambientales*. Obtenido de <http://ambiental.cedex.es/docs/Ingenieria-Civil-142-2006-Aplicaciones-LiDAR.pdf>

- Mohammad Ali Hidalgo, M. H. (2014). *Diseño y construcción de un robot móvil experimental 8x8 articulado para salvar obstáculos*. Sangolqui.
- Nilsson, N. J. (1969). *A MOBILE AUTOMATON: AN APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES*. Menlo Park, California.
- O'Donnell, F. (Julio de 1997). *Mars Pathfinder*. Obtenido de <http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/newspio/pkts/mpfland2.pdf>
- Ortiz, A. (s.f.). *Universitat de les Illes Balears*. Obtenido de http://dmi2.uib.es/~aortiz/mobots_navegacion.pdf
- Peremans, H., Audenaert, K., & Van Campenhout, J. (1993). *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*. IEEE.
- PULSED LIGHT LLC. (Julio de 2014). LIDAR-Lite V2 Overview.
- Quezada Cepeda, D. P. (2014). *Diseño y construcción de un robot todo terreno utilizando el sistema ROCKER-BOGIE y teleoperado inalámbricamente para el laboratorio de robótica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*. Sangolqui.
- Reuter, A. F. (Febrero de 2001). *Sistemas de Posicionamiento Global - Sistema GPS*. Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Riisgaard, S., & Rufus Blas, M. (s.f.). *SLAM for Dummies, A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping*.
- Robotics, S. V. (s.f.). *Industrial robotics pioneer Joe Engelberger turns 90*.
- Shin, D., & Shing, S. (1990). *Path Generation for Robot Vehicles Using Composite Clothoid Segments*. Pittsburgh, Pensilvania: The Robotics Institute Carnegie-Mellon University .
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Londres: Cambridge.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. México: Mc Graw Hill.
- Viñals Pons, J. (2012). *Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect, Universidad politecnica de Valencia*.

Viñals Pons, J. (2012). *Localización y generación de mapas del entorno (SLAM) de un robot por medio de una Kinect*.

Yacuzzi, E., & Martín, F. (2003). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Buenos Aires: C.E.M.A.

ANEXOS

ANEXO A

Manual de usuario

ANEXO B

DATOS TÉCNICOS – LIDAR LITE V2

ANEXO C

DATOS TÉCNICOS – GPS EM-506

ANEXO D

DATOS TECNICOS – DRIVER MOSNTER SHIELD

ANEXO E
PLANOS MECÁNICOS

ANEXO F

Aspectos relevantes proyecto (Guano Chicaiza & Sevilla Riofrío, 2015)

ANEXO G

Nodos, tópicos utilizados por el sistema y su interconexión en el sistema ROS