



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA/O EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA
MÓVIL OMNIDIRECCIONAL PARA LA GENERACIÓN
TRIDIMENSIONAL FIABLE DE ENTORNOS CERRADOS UTILIZANDO
TECNOLOGÍA SLAM 3D EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN
LATACUNGA.”**

**AUTORES: CHUQUITARCO MALLITASIG, DIEGO XAVIER
QUIMBITA BEDÓN, STALIN SANTIAGO**

DIRECTOR: ING. MENDOZA CHIPANTASI, DARÍO JOSÉ

LATACUNGA

2019



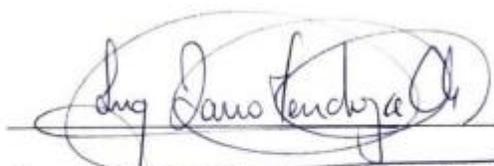
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICADO DEL DIRECTOR

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL OMNIDIRECCIONAL PARA LA GENERACIÓN TRIDIMENSIONAL FIABLE DE ENTORNOS CERRADOS UTILIZANDO TECNOLOGÍA SLAM 3D EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”*** fue realizado por los señores ***Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier y Quimbita Bedón, Stalin Santiago*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, mayo del 2019



Ing. Darío José Mendoza Chipantasi

C.C.: 0603110834



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier* y *Quimbita Bedón, Stalin Santiago*, declaramos que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL OMNIDIRECCIONAL PARA LA GENERACIÓN TRIDIMENSIONAL FIABLE DE ENTORNOS CERRADOS UTILIZANDO TECNOLOGÍA SLAM 3D EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, mayo del 2019

Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier

C.C.: 0503238248

Quimbita Bedón, Stalin Santiago

C.C.:0502567902



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier y Quimbita Bedón, Stalin Santiago, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL OMNIDIRECCIONAL PARA LA GENERACIÓN TRIDIMENSIONAL FIABLE DE ENTORNOS CERRADOS UTILIZANDO TECNOLOGÍA SLAM 3D EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”**, en el repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Latacunga, mayo del 2019

Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier

C.C.: 0503238248

Quimbita Bedón, Stalin Santiago

C.C.: 0502567902

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado principalmente a Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre Victoria, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño, quien permanentemente me apoyo con su espíritu alentador sin importar nuestras diferencias de opiniones, contribuyendo incondicionalmente a lograr las metas y objetivos propuestos.

A mi padre Jorge, que, a pesar de no tenerlo a mi lado, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.

A mis abuelitos, quienes siempre han estado presentes no solo en esta etapa tan importante de mi vida, sino en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mi persona.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mí novia, por extenderme su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias Cinty, siempre te llevo en mi corazón.

Stalin Quimbita

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado al pilar fundamental de mi vida, mi madre. Mi afán siempre fue reflejar en mis ojos su orgullo, su felicidad y alegría, su infinito amor y su satisfacción.

A mis hermanos y demás familiares, personas humildes y honestas que con su ejemplo supieron ser guías durante todo este trayecto.

A mis amigos, personas imperfectas que se convirtieron en un vínculo perfecto llamado familia.

A mi abuelito Manuel y a un gran amigo y compañero, Bismar, personas demasiado buenas para este mundo.

Y a todos aquellos que creyeron y no creyeron en mí.

Diego Chuquitarco

AGRADECIMIENTO

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado se ha notado menos.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi madre por ser la principal promotora de mis sueños, gracias por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

De la misma manera mis agradecimientos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, a cada uno de mis docentes, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

Igual mente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Darío Mendoza, tutor del proyecto quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió hoy culminar este trabajo.

Finalmente deseo expresar a todos mis amigos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad. Por esa amistad que compartimos en las aulas, apoyándonos el uno con el otro para cumplir una meta en común.

Stalin Quimbita

AGRADECIMIENTO

He culminado un peldaño más y las palabras de agradecimiento a mi madre por el enorme sacrificio, dedicación y esfuerzo no serían suficientes pero todas se resumirían a dos, la amo. Es lo mejor que tengo y tendré.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga y su personal docente por permitirme ser parte de este grupo selecto y privilegiado de estudiantes que alcanzan una ingeniería.

Sincero agradecimiento a mis familiares, quienes estuvieron pendientes de mi en todo momento, apoyándome y animándome a ser siempre mejor.

Finalmente, y no menos importante a mis amigos, por su paciencia, compañía, bromas, viajes y un sin número de aventuras que quedaran grabadas en la memoria por siempre, ¡son los mejores muchachos!

Diego Chuquitarco

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
RESUMEN.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxiv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Justificación e Importancia.....	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos	7
1.5. Alcance	8

1.6. Estructura del documento	8
-------------------------------------	---

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a la robótica móvil.....	10
2.1.1 Historia de la robótica.....	10
2.1.2 Primeros desarrollos en robótica móvil.....	10
2.1.3 Robótica móvil	11
2.1.4 Clasificación de los robots móviles	11
2.1.5 Robots móviles omnidireccionales.....	13
2.1.6 Ruedas omnidireccionales	14
2.2 Tipos de robots omnidireccionales	18
2.2.1 Robots omnidireccionales de tres ruedas.....	19
2.2.2 Robots omnidireccionales de cuatro ruedas	20
2.3 Modelado cinemático del robot móvil.....	22
2.4 Percepción	23
2.4.1 Clasificación Sensorial	25
2.5 Localización de un robot móvil.....	26
2.6 Localización y mapeado simultáneo SLAM	26
2.6.1 Landmarks	27
2.6.2 Asociación de datos.....	27
2.6.3 Estimación y actualización del estado.....	27
2.6.4 Diagrama de procesos del algoritmo SLAM	28
2.6.5 Representación de mapas.....	29

2.6.6	Software para la localización y mapeado simultaneo SLAM.....	30
2.7	Resumen	30

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL SISTEMA

3.1.	Parámetros de diseño de la plataforma móvil.....	32
3.2.	Definición de necesidades	32
3.3.	Definición de especificaciones	33
3.4.	Definición de subsistemas	34
3.4.1.	Subsistema 1: Estructura	35
3.4.2.	Subsistema 2: Energía	36
3.4.3.	Subsistema 3: Mapeo y Localización	36
3.4.4.	Subsistema 4: Vehículo omnidireccional	36
3.4.5.	Subsistema 5: Acceso remoto PC.....	36
3.5.	Evaluación y selección	36
3.5.1.	Subsistema 1: Estructura	37
a.	Alternativas de Estructura.....	37
b.	Ponderación y selección de estructuras	39
c.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	40
3.5.2.	Subsistema 2: Energía	40
a.	Alternativas de baterías:.....	41
b.	Ponderación y selección de las baterías.....	43
c.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	44
3.5.3.	Subsistema 3: Mapeo y Localización	44

a.	Sensores 3D	44
a1.	Alternativas de Sensores	45
a2.	Ponderación y selección de los sensores.....	48
a3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	49
b.	MICROPROCESADORES	49
b1.	Alternativas de microprocesadores.....	50
b2.	Ponderación y selección de los microprocesadores.....	52
b3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	53
3.5.4.	Subsistema 4: Vehículo omnidireccional	53
a.	Locomoción.	53
a1.	Alternativas de sistemas de locomoción.....	54
a2.	Ponderación y selección de las alternativas.....	56
a3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	57
b.	Placa de código abierto.....	57
b1.	Alternativas de microcontroladores.....	58
b2.	Ponderación y selección de las alternativas.....	59
b3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	60
c.	Sensor.....	61
c1.	Alternativas de sensores	61
c2.	Ponderación y selección de sensores	63
c3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	64
d.	Motor... ..	64
d1.	Alternativas de tipos de motores	65
d2.	Ponderación y selección de los motores	66

d3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	67
e.	Rueda	67
e1.	Alternativas de ruedas.....	68
e2.	Ponderación y selección de las ruedas omnidireccionales.....	69
e3.	Conclusión de la Evaluación y Selección realizada	70
3.5.6.	Subsistema 5: Acceso remoto PC.....	70
3.6.	Descripción del diseño.....	70
3.6.1.	Subsistema 1. Estructura	71
a.	Diseño mecánico.....	72
a1.	Análisis de Esfuerzos de la estructura del Robot Móvil.....	73
a2.	Acople de tracción	87
a3.	Soporte de Sensores Ultrasónicos.....	89
a4.	Acople sensor Kinect.....	90
3.6.2	Energía.....	91
3.6.3.	Subsistema 3: Mapeo y Localización	93
3.6.4.	Subsistema 4: Vehículo Omnidireccional	95
3.7	Diseño final	104
3.8	Resumen	105

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

4.1.	Estructura.....	107
4.1.1.	Corte de la estructura.....	107
4.1.2	Unión de la estructura.....	108

4.1.3. Unión del sistema electrónico.....	111
4.1.4. Mapeo: Crear, Guardar y Cargar	113
4.2 Pruebas de funcionamiento.....	121
4.3 Validación de la hipótesis.....	124

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	128
5.2 RECOMENDACIONES	130

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS132

ANEXOS136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Necesidades de la plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional de entornos cerrados</i>	25
Tabla 2	<i>Necesidades de la plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional de entornos cerrados</i>	33
Tabla 3	<i>Métricas de las necesidades para el robot omnidireccional</i>	33
Tabla 4	<i>Subsistemas del robot omnidireccional</i>	35
Tabla 5	<i>Calificación para tablas de ponderación</i>	37
Tabla 6	<i>Ponderación de parámetros para seleccionar el tipo de estructura</i>	38
Tabla 7	<i>Alternativas de forma para selección de la estructura</i>	39
Tabla 8	<i>Ponderación con respecto al Diseño</i>	39
Tabla 9	<i>Ponderación con respecto a la Movilidad</i>	40
Tabla 10	<i>Ponderación final y selección de la forma de la estructura</i>	40
Tabla 11	<i>Ponderación de parámetros para seleccionar una batería</i>	41
Tabla 12	<i>Ventajas y desventajas de una batería de Ion-Litio</i>	42
Tabla 13	<i>Ventajas y desventajas de las baterías secas</i>	42
Tabla 14	<i>Ponderación de las baterías en base a la precisión</i>	43
Tabla 15	<i>Ponderación de las baterías en base a la confiabilidad</i>	43
Tabla 16	<i>Ponderación de las baterías en base a su portabilidad</i>	43
Tabla 17	<i>Ponderación final y selección de la fuente de energía</i>	44
Tabla 18	<i>Ponderación de las tecnologías para elección del mapeo y localización</i>	45
Tabla 19	<i>Ventajas y desventajas del Sensor Kinect</i>	46
Tabla 20	<i>Ventajas y desventajas del Sensor Asus Xtion Pro Live</i>	47

Tabla 21	<i>Ventajas y desventajas del Sensor RealSense 3D de Intel</i>	47
Tabla 22	<i>Ponderación para evaluar los sensores en base a la precisión</i>	48
Tabla 23	<i>Ponderación para evaluar los sensores en base al costo</i>	48
Tabla 24	<i>Ponderación para evaluar los sensores en base a la compatibilidad</i>	48
Tabla 25	<i>Ponderación final y selección del sensor</i>	48
Tabla 26	<i>Ponderación de criterios de evaluación para los ordenadores de placa</i>	49
Tabla 27	<i>Ventajas y Desventajas del ODROID</i>	50
Tabla 28	<i>Ventajas y Desventajas del UP BOARD</i>	51
Tabla 29	<i>Ventajas y Desventajas del Raspberry Pi 3</i>	51
Tabla 30	<i>Ponderación para evaluar los microprocesadores en base al costo</i>	52
Tabla 31	<i>Ponderación para evaluar los microprocesadores en base al tamaño</i>	52
Tabla 32	<i>Ponderación para evaluar los microprocesadores en base a la velocidad de procesamiento</i>	52
Tabla 33	<i>Ponderación final y elección del microcontrolador.</i>	53
Tabla 34	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el sistema de Locomoción</i>	54
Tabla 35	<i>Ventajas y Desventajas del Vehículo omnidireccional de 3 ruedas</i>	55
Tabla 36	<i>Ventajas y Desventajas del Vehículo omnidireccional de 4 ruedas</i>	55
Tabla 37	<i>Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al costo</i>	56
Tabla 38	<i>Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al tamaño</i>	56
Tabla 39	<i>Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al control</i>	56
Tabla 40	<i>Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base a la movilidad</i>	56
Tabla 41	<i>Ponderación final y elección del sistema de locomoción</i>	57
Tabla 42	<i>Ponderación de parámetros de microcontroladores</i>	58
Tabla 43	<i>Ventajas y desventajas de la placa Arduino Mega</i>	59

Tabla 44	<i>Ventajas y desventajas del Basic Stamp 2</i>	59
Tabla 45	<i>Ponderación de microcontroladores en base a su costo</i>	60
Tabla 46	<i>Ponderación de microcontroladores en base a cantidad de entradas y salidas</i>	60
Tabla 47	<i>Ponderación de microcontroladores en base a compatibilidad</i>	60
Tabla 48	<i>Ponderación final de microcontroladores</i>	60
Tabla 49	<i>Ponderación de los sensores en base a los parámetros establecidos</i>	61
Tabla 50	<i>Ventajas y Desventajas de usar un sensor Ultrasónico HC-SR04</i>	62
Tabla 51	<i>Ventajas y Desventajas de usar un sensor Ultrasónico SRF08</i>	62
Tabla 52	<i>Ponderación de sensores en base a su Alcance</i>	63
Tabla 53	<i>Ponderación de sensores en base al Ángulo de visión</i>	63
Tabla 54	<i>Ponderación de sensores en base al Costo</i>	63
Tabla 55	<i>Ponderación final de los sensores en base a los parámetros establecidos</i>	64
Tabla 56	<i>Ponderación de los parámetros del motor</i>	65
Tabla 57	<i>Ventajas y Desventajas de los motores paso a paso</i>	65
Tabla 58	<i>Ventajas y Desventajas de un motor de corriente continúa</i>	66
Tabla 59	<i>Ponderación de motores en base a su potencia</i>	66
Tabla 60	<i>Ponderación de motores en base a los RPM</i>	66
Tabla 61	<i>Ponderación de motores en base al consumo de energía</i>	66
Tabla 62	<i>Ponderación final de los motores en base a los parámetros establecidos</i>	67
Tabla 63	<i>Ponderación de las ruedas en base a los parámetros establecidos</i>	67
Tabla 64	<i>Ventajas y Desventajas de la Rueda omnidireccional</i>	68
Tabla 65	<i>Ventajas y Desventajas de la Rueda Mecanum</i>	69
Tabla 66	<i>Ponderación de las ruedas en base al costo</i>	69
Tabla 67	<i>Ponderación de las ruedas en base a la tracción</i>	69

Tabla 68 <i>Ponderación de las ruedas en base a la velocidad</i>	69
Tabla 69 <i>Ponderación final de la selección de las ruedas</i>	70
Tabla 70 <i>Tabla resumen de los elementos de la Plataforma móvil omnidireccional</i>	71
Tabla 71 <i>Elementos que conforman la plataforma por cada piso</i>	71
Tabla 72 <i>Cálculo de masa de los elementos del vehículo omnidireccional</i>	84
Tabla 73 <i>Propiedades del PMMA</i>	86
Tabla 74 <i>Peso por metro cuadrado</i>	86
Tabla 75 <i>Consumo de energía de los Elementos que conforman la plataforma</i>	91
Tabla 76 <i>Especificaciones técnicas del Sensor Kinect</i>	94
Tabla 77 <i>Características técnicas del ODROID-XU4</i>	94
Tabla 78 <i>Características Técnicas del Arduino Mega 2560</i>	95
Tabla 79 <i>Características Técnicas de los sensores ultrasónicos HC-SR04</i>	96
Tabla 80 <i>Comparación de Motores con tención nominal 2.1 Amperios</i>	102
Tabla 81 <i>Detalle de componentes de la plataforma móvil</i>	104
Tabla 82 <i>Valores de errores en las medidas de imágenes mapeadas en modo teleoperado</i>	122
Tabla 83 <i>Valores de errores en las medidas de imágenes mapeadas en modo automático</i>	122
Tabla 84 <i>Condiciones para la hipótesis</i>	124
Tabla 85 <i>Frecuencias observadas</i>	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de navegación autónomo basado en SLAM y navegación reactiva.....	4
Figura 2. Robot móvil para SLAM con recuperación de ubicación	4
Figura 3. Configuraciones de los RMR.....	12
Figura 4. Tipos de ruedas.	13
Figura 5. Manipuladores móviles marca Kuka.	14
Figura 6. Estructura de un robot omnidireccional.....	14
Figura 7. a) Rueda omnidireccional universal, b) Ruedas omnidireccionales dobles, c) Ruedas Mecanum, d) Rueda Esférica	15
Figura 8. Rueda omnidireccional doble	16
Figura 9. Rueda Mecanum Omnidireccional.	17
Figura 10. Componentes de la fuerza ejercida sobre la rueda Mecanum.....	18
Figura 11. Rueda esférica.....	18
Figura 12. Estructura y disposición de un robot omnidireccional de tres ruedas.	19
Figura 13. Modelo esquemático del robot de tres ruedas.....	20
Figura 14. Robot omnidireccional circular de 4 ruedas.	21
Figura 15. Disposición de las ruedas y distribución de las fuerzas.....	21
Figura 16. Rueda Mecanum resistente montada en AuckBot	22
Figura 17. Rueda en contacto con la superficie	23
Figura 18. Cuadro resumen de los distintos sistemas de estimación de la posición.	24
Figura 19. Diagrama EKF-SLAM.....	29
Figura 20. Esquema de la función del robot omnidireccional	34
Figura 21. Subsistemas de la plataforma omnidireccional.....	35

Figura 22. Alternativas de forma para selección de la estructura	39
Figura 23. Elementos que conforman la plataforma por cada piso	72
Figura 24. Estructura de la Plataforma móvil omnidireccional	73
Figura 25. Estructura del vehículo omnidireccional.	74
Figura 26. Lados del hexágono	75
Figura 27. Cara lateral 1, 3 y 5.....	76
Figura 28. Cara lateral 2, 4 y 6.....	77
Figura 29. Lados del triángulo para el acople del sensor ultrasónico	78
Figura 30. Rectángulo del acople del sensor ultrasónico	78
Figura 31. Cara 1 del acople para el sensor Kinect.....	80
Figura 32. Caras 2 y 3 del acople para el sensor Kinect	80
Figura 33. Caras 4 y 5 del acople para el sensor Kinect	81
Figura 34. Caras 1 y 2 del acople de la batería	82
Figura 35. Caras 3 y 4 del acople de la batería	83
Figura 36. Acople llanta-motor	87
Figura 37. Sujeción acople-llanta.....	87
Figura 38. Sujetador motor-estructura	88
Figura 39. Unión de elementos	88
Figura 40. Sujeción de elementos a la plataforma	88
Figura 41. Estructura para adaptar sensores ultrasónicos	89
Figura 42. Sensores ultrasónicos acoplados	89
Figura 43. Sensores ultrasónicos acoplados a la estructura	90
Figura 44. Acople sensor kinect.....	90
Figura 45. Sensor Kinect acoplado a la estructura	91

Figura 46. Subsistema mapeo y localización	93
Figura 47. Vehículo Omnidireccional.....	95
Figura 48. Esquema de la posición de las ruedas en un sistema de locomoción omnidireccional.....	97
Figura 49. Rotación del robot en sentido horario.....	100
Figura 50. Desplazamiento hacia adelante del robot	101
Figura 51. Vista aérea de los elementos que conforman la plataforma por cada piso	104
Figura 52. Vista posterior de los elementos de la plataforma	105
Figura 53. Vista inferior de la Estructura.....	105
Figura 54. Vista lateral de la Plataforma móvil omnidireccional	105
Figura 55. Impresión de la estructura.....	107
Figura 56. Unión de la estructura.....	108
Figura 57. Forma de la estructura.....	108
Figura 58. Acople de motores	109
Figura 59. Ensamblaje de motores	109
Figura 60. Sujeción de los elementos.....	110
Figura 61. Impresión de las bases de los sensores	110
Figura 62. Ubicación de los sensores	111
Figura 63. Comunicación de radiofrecuencia.	112
Figura 64. Conexión Motor - Puente H – Arduino	113
Figura 65. Algoritmo de mapeo para el modo Automático	115
Figura 66. Visualización del proceso de creación del mapeo	116
Figura 67. Visualización del proceso de creación del mapeo	117
Figura 68. Tablas que se crean automáticamente al generar el mapeo	118

Figura 69. Interfaz de acceso	118
Figura 70. Menú principal.....	118
Figura 71. Recorrido de la plataforma	119
Figura 72. Error en el movimiento de la plataforma.....	120
Figura 73. Base de datos de la plataforma	120
Figura 74. Botón medidas	121
Figura 75. Prueba 1- Mapeado de la plataforma móvil omnidireccional en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.	123
Figura 76. Prueba 2- Mapeado de la plataforma móvil omnidireccional en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.	123

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se construyó una plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, teniendo en consideración que el SLAM 3D busca resolver los problemas que existen para ubicar un robot en un entorno inexplorado, y que él mismo pueda levantar un mapa del ambiente mientras se determina su propia localización. En primer lugar, para realizar el diseño de la plataforma móvil se seleccionaron los componentes que formaron parte del sistema móvil, considerando un bajo costo y su disponibilidad en el mercado; posteriormente se planteó un algoritmo de generación de localización y mapeo, acorde con los requerimientos de la plataforma móvil. La plataforma cuenta con 6 sensores de detección de obstáculos para prevenir colisiones con objetos al momento de realizar desplazamientos, también se integró un sensor Kinect para captar el entorno por donde se desplaza y luego convertir esta información en mapas tridimensionales. Finalmente para la validación del sistema se valoró el diseño de la plataforma robótica móvil en diferentes entornos, siendo totalmente satisfactoria, debido a que existió una variación de margen de error de medida relativamente bajo, teniendo como resultado que la plataforma omnidireccional cumple de forma adecuada con los objetivos esperados.

PALABRAS CLAVE

- **ROBOT MÓVIL**
- **LOCALIZACIÓN Y MAPEO SIMULTÁNEO (SLAM)**
- **MICROPROCESADORES**
- **PLATAFORMA MÓVIL**

ABSTRACT

In the present work of titling an omnidirectional mobile platform was built for the reliable three-dimensional generation of closed environments using 3D SLAM technology in the Mechatronics Laboratory of the University of the Armed Forces, ESPE Extension Latacunga, taking into consideration that the 3D SLAM seeks to solve the problems that exist to locate a robot in an unexplored environment, and that he himself can draw a map of the environment while determining his own location. In the first place, to design the mobile platform, the components that were part of the mobile system were selected, considering a low cost and its availability in the market. Subsequently, an algorithm for generating location and mapping was proposed, in accordance with the requirements of the mobile platform. The platform has 6 obstacle detection sensors to prevent collisions with objects when making trips, a Kinect sensor was also integrated to capture the environment through which it moves and then convert this information into three-dimensional maps. Finally, for the validation of the system, the design of the mobile robotic platform was evaluated in different environments, being totally satisfactory, due to the fact that there was a variation of the relatively low error margin of measurement, resulting in the omnidirectional platform fulfilling adequately with the expected objectives.

KEYWORDS

- **MOBILE ROBOT**
- **LOCALIZATION AND SIMULTANEOUS MAPPING (SLAM)**
- **MICROPROCESSORS**
- **MOBILE PLATFORM**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El primer capítulo señala la necesidad de diseño y construcción de una plataforma móvil omnidireccional acreditando su desarrollo e implementación. Además, indica un transitorio análisis de investigaciones preliminares concernientes con dispositivos móviles, se presenta el planteamiento del problema, antecedentes, justificación e importancia, objetivos, alcance y estructura del documento.

1.1. Planteamiento del Problema

Las universidades al presente y en específico, la mecatrónica se ha enfocado a proyectos de exploración robótica con el intento de generar conocimiento y su apogeo se ha visto enfocada a los robots móviles de mapeo.

La ausencia de autonomía en plataformas móviles omnidireccionales que consientan un desplazamiento a un sitio específico a través de un recorrido predestinado, genera la necesidad de su construcción, siendo esta capaz de evadir obstáculos sin que el operario intervenga en el manejo.

En la robótica móvil gran parte de los robots son proyectados para moverse sobre ambientes conocidos, es así que si se coloca un robot en un entorno diferente al que fue programado, no tendrá el mismo desempeño de siempre, y aunque logre ubicarse haciendo uso de sus algoritmos de localización, la acumulación del error durante su desplazamiento en un entorno inexplorado se incrementa a tal punto que el robot puede llegar a estar totalmente desorientado. A partir de allí

se aborda la necesidad de conocimiento del entorno en el que se mueven, creando de esta manera diseños de incertidumbre sobre posición, ubicación y destino.

La falta de plataformas móviles omnidireccionales que permitan la recreación de un ambiente desconocido de forma autónoma genera necesidades de investigación más amplias respecto a mapeos con SLAM 3D en zonas de peligro para seres humanos, como manipulación de explosivos, desactivación de bombas, inspección visual y censado de lugares con gases deletéreos o con riesgo de derrumbes.

La necesidad de formar un sistema de procesos complejos tales como conceptualización del hardware, control de dispositivos de bajo nivel, implementación de operatividad de uso común, paso de mensajes entre procesos y mantenimiento de paquetes, donde el procesamiento tome lugar en la red de procesos que pueden recibir, enviar y multiplexar mensajes de sensores, control, proyecciones y ejecuciones de la plataforma móvil, entre otros requiere la utilización de ROS (Sistema Operativo Robótico)

Es importante identificar que un sistema GPS es utilizado para misiones de exploración en exteriores, sin embargo, para misiones en interiores los sistemas de navegación por satélite no son válidos, siendo necesario el desarrollo de este tipo de tecnología SLAM 3D en plataformas móviles equipadas para indagar en espacios donde se forman tramos con poca visibilidad e inaccesible para humanos.

Nace también la necesidad de suplantar robots exploratorios por robots móviles con tecnología SLAM 3D debido a que las cámaras utilizadas en robots de expedición no cubren aspectos importantes de visualización en tiempo real, es decir, no generan una referencia exacta total del

lugar, sino que lo hacen por segmentos dificultando el procedimiento de sondeo y generando retrasos a los mismos.

La implementación de tecnología SLAM 2D limita el mapeo del ambiente cerrado debido a que este proporciona segmentos de líneas, formando un modo de vista semejante a un plano en el cual no presenta una descripción detallada del ambiente; además de que esta tecnología se inclina a ser evaluada en entornos simétricos en donde la obtención de información no muestra un límite de error, estableciendo de esta manera la importancia en el uso de la tecnología SLAM 3D.

1.2. Antecedentes

Dentro de las investigaciones efectuadas en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE concurrentes a robótica móvil resaltan las siguientes:

1. Implementación de un sistema de navegación autónomo basado en SLAM y navegación reactiva (Quinaluisa Martínez & Toapanta Campoverde , 2018). La cual es una plataforma robótica móvil para interiores SIMBA, que posee configuración diferencial en su movimiento y estructura de forma circular, además cuenta con un sensor láser omnidireccional 360°, sensores ultrasónicos e infrarrojos.

Para el control de los dispositivos que conforman los sistemas se utiliza la tarjeta Raspberry Pi2 modelo B ubicada en la plataforma móvil.

En la figura 1 se muestra el sistema desarrollado en funcionamiento, el cual es capaz de trasladar objetos de un lugar a otro de manera automática y realizar levantamientos de mapas en interiores.



Figura 1. Sistema de navegación autónomo basado en SLAM y navegación reactiva
Fuente: (Quinaluisa Martínez & Toapanta Campoverde , 2018) .

2. Diseño y construcción de un robot móvil para SLAM con recuperación de ubicación en el caso de raptó (Carrera Cepeda, 2018). Este sistema utiliza motores paso a paso cuya configuración de locomoción es de tipo Skid-Steer, esta plataforma móvil es capaz de medir el entorno mediante Rplidar 360° el cual es controlado por la tarjeta Raspberry pi2 modelo B.

En la figura 2. Se muestra el robot móvil el cual posee un porcentaje de error de 3,85% en los mapeos realizados por el dispositivo móvil.



Figura 2. Robot móvil para SLAM con recuperación de ubicación
Fuente: (Carrera Cepeda, 2018).

Las investigaciones mencionadas precedentemente se consideran significativas para la implementación del dispositivo omnidireccional ya que manejan conceptos matemáticos sobre el diseño de plataformas móviles y además presentan sistemas de captación y detección de ambientes en forma de mapas, los cuales permiten poseer un punto de partida y así mejorar estos sistemas presentando una nueva alternativa en el desarrollo de plataformas móviles omnidireccionales que realicen mapeos en tres dimensiones.

1.3. Justificación e Importancia

La continua investigación universitaria mecatrónica requiere de exploraciones enfocadas a la robótica móvil omnidireccional en la cual se puede discernir como aspecto importante su autonomía y la capacidad de generación tridimensional fiable de un ambiente cerrado o lugares no explorados por el humano, brindando independencia y eficiencia a estas plataformas móviles, algo que no es difícil de encontrar en robots tradicionales.

La localización y mapeo simultáneo 3D investiga los problemas que plantea la construcción de modelos matemáticos, geométricos o lógicos de entornos físicos, utilizando como instrumento un robot móvil y un grupo de sensores y actuadores que son parte de todo el sistema.

El SLAM 3D busca resolver los problemas que nacen al ubicar un robot en un entorno inexplorado, y que él mismo sea capaz de levantar incrementalmente un mapa consistente del ambiente mientras se determina su propia localización, todo esto en un mismo proceso. Es así que se le asigna a este, la necesidad de razonar en un mundo a veces confuso, en ocasiones dinámico y cambiante, mediante sensores que difieren mucho de ser perfectos. Todo este desarrollo se asocia con la autonomía del robot.

Es importante identificar que un robot autónomo tradicional de mapeo al ser cambiado de entorno tiende a fallar, es por eso que los robots móviles omnidireccionales con tecnología SLAM 3D son valiosas para la industria, contribuyendo con beneficios a sectores como el manufacturero, militar, hasta el ocio y entretenimiento. Su aplicabilidad en sistemas de producción, manipulación de explosivos, desactivación de bombas, reconocimiento visual y censado de zonas con gases tóxicos o lugares con peligro de derrumbes, y en general cualquier tipo de tareas donde la presencia de seres humanos implique un riesgo, permiten evidencia la importancia de su uso.

La utilidad de la tecnología SLAM 3D consienten el funcionamiento en espacios cubiertos teniendo estos un error mínimo a diferencia de un sistema de navegación GPS el cual se maneja en ambientes exteriores con una condición de error mayor. De esta manera SLAM 3D, optimiza tecnologías de exploración.

La importancia de ROS radica en la funcionalidad para la abstracción de hardware, controladores de dispositivo, comunicación entre procesos en máquinas múltiples, materiales para ensayos y visualización y entre otros. La característica principal de ROS es el modo en cómo se establece el software y su comunicación, ya que accede a diseñar software complejo sin conocer a ciencia cierta el hardware. ROS proporciona una manera de conectar una red de procesos (nodos) con eje central, colaborando así con una eficiente integración del sistema mecatrónico.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y construir una plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

1.4.2. Objetivos Específicos

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

- Investigar sobre los sistemas SLAM 3D.
- Diseñar una plataforma móvil omnidireccional adecuada para la obtención de datos a procesar en un entorno cerrado.
- Seleccionar los componentes que serán parte del sistema móvil, teniendo en cuenta un bajo costo y disponibilidad en el mercado.
- Estudiar el algoritmo de generación de localización y mapeo, acorde con los requerimientos de la plataforma móvil.
- Implementar SLAM 3D en una plataforma móvil omnidireccional.
- Realizar toma de datos a través de pruebas en diferentes ambientes para una posterior validación del sistema.
- Identificar el margen de fiabilidad en las reconstrucciones tridimensionales a través de pruebas en ambientes con diferentes iluminaciones.

1.5. Alcance

Este trabajo pretende extender las investigaciones sobre la robótica móvil realizadas en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para lo cual se efectuarán los siguientes procedimientos:

Se diseñará y se implementará un robot móvil omnidireccional con una estructura capaz de realizar movimientos omnidireccionales que permitan desplazamientos exactos consiguiendo así evadir obstáculos, además será idónea para soportar el peso de los elementos seleccionados.

Se instalará un sistema de locomoción que presente la mejor alternativa para desplazamientos omnidireccionales y capturas del ambiente, los motores y llantas seleccionadas deberán poseer características de sujeción, precisión, entre otras y además deberán ser validadas mediante cálculos matemáticos que respalden la viabilidad del diseño.

Se instalará sensores de detección de obstáculos para prevenir colisiones con objetos al momento de realizar desplazamientos, también se integrará un sensor Kinect para captar el entorno por donde se desplazará la plataforma móvil y por medio de una tarjeta electrónica convertir esta información captada en mapas tridimensionales, los cuales lograrán ser visualizados por una estación remota situada en un computador con acceso a dicha tarjeta.

1.6. Estructura del documento

El presente proyecto está constituido por cinco capítulos en los cuales se mostrará y describirá toda la información correspondiente al diseño y construcción de la plataforma omnidireccional.

En el primer capítulo se muestran las generalidades y antecedentes de investigaciones relacionadas, además se definen los objetivos y el alcance de estos.

El segundo capítulo presenta un estado del arte sobre plataformas robóticas móviles y métodos para realizar mapeos tridimensionales, además muestra el desarrollo de la teoría que fundamentó esta investigación, revisando conceptos enfocados a plataformas omnidireccionales.

El tercer capítulo puntualiza las exigencias técnicas necesarias para la implementación del dispositivo, las opciones de selección de materiales y la ponderación final para aprobar esta selección.

En el cuarto capítulo se exhibe la construcción e implementación de los sistemas desarrollados en la plataforma móvil omnidireccional donde se detallan las pruebas realizadas y la información obtenida.

En el quinto capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones alcanzadas durante el desarrollo e implementación de la plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

El segundo capítulo presenta definiciones sobre plataformas robóticas móviles, además se analiza la cinemática, localización y navegación de dispositivos móviles omnidireccionales. También se muestra métodos de localización y mapeo simultáneo SLAM que formaran parte de la plataforma móvil.

2.1 Introducción a la robótica móvil

2.1.1 Historia de la robótica

Actualmente la robótica móvil se considera como un área de tecnología avanzada que maneja problemas de alta complejidad.

La robótica ha ido evolucionando hasta llegar a los sistemas móviles autónomos, los cuales se caracterizan por desenvolverse por sí mismos en entornos parcialmente cambiantes y desconocidos, sin requerir de la intervención del hombre (Bermúdez, 2002).

2.1.2 Primeros desarrollos en robótica móvil

En 1953 se construyó en Inglaterra el primer robot móvil, el cual fue denominado como ELSIE. Este robot únicamente se dedicaba a seguir una fuente de luz haciendo uso de un sistema mecánico realimentado sin adicionar ningún tipo de inteligencia. En los setenta se construyó a MARS-ROVER por intervención de la NASA junto con Jet Propulsion Laboratory, este robot se conformó por un brazo mecánico, un dispositivo telemétrico láser, cámaras estéreo y sensores de

proximidad. La robótica fue evolucionando hasta que en los ochenta aparece CART del SRI el cual opera con procesado de imagen estéreo.

Michael Cancel, director del Centro de Aplicaciones Robóticas de *Science Application Inc.* determina que la robótica se divide en cinco generaciones, las dos primeras se basaban en robots con poca autonomía y enfocados en tareas repetitivas. La tercera generación abarca las décadas de los ochenta y noventa, la misma que dio inicio a la visión artificial. En la cuarta se da inicio a la movilidad avanzada en exteriores e interiores y finalmente la quinta generación profundiza la inteligencia artificial, etapa que actualmente continúa desarrollándose (Espantoso, 2009)

2.1.3 Robótica móvil

Los robots autónomos han despertado un gran interés en el mundo, motivo por el cual cada vez se van implementado técnicas de control bajo soporte del software y hardware moderno. Para lograr que el robot se desplace o realice alguna actividad de forma autónoma, se implementa rieles, ruedas, entre otros.

De acuerdo a ello se define que el robot móvil parte de la teoría clásica de robots que menciona: “Un robot móvil es un vehículo de propulsión autónoma y movimiento (re) programado por medio de control automático para realizar una tarea específica” (Lazea, 2001)

2.1.4 Clasificación de los robots móviles

Los robots móviles pueden clasificarse en dos grupos que son: guiados y no guiados. El primero se limita a seguir trayectorias establecidas previamente, las mismas que son guardadas en la memoria, por esta razón es imposible que el robot abandone la trayectoria. Los vehículos no-guiados no están ligados a trayectorias predefinidas. Dentro de este grupo se encuentran los

robots submarinos, los aéreo–espaciales y los terrestres, estos últimos pueden ser clasificados de acuerdo a su sistema de movimiento en: robot con ruedas, con patas o por orugas (Aguilera, Bautista, & Iruegas, 2007).

El mayor desarrollo dentro del campo de la robótica son los Robots Móviles con Ruedas (RMR) debido a las ventajas que tienen estos en relación a las patas y a las orugas. Los RMR presentan gran eficiencia con respecto a energía, en superficies lisas y firmes, no dañan la superficie que recorren, además requieren un número menor de partes y menos complejas en relación con los robots de patas y orugas, lo cual facilita su construcción. En la Figura 3 se puede observar los diferentes tipos de locomoción (Barrientos, García, & Silva, 2007).

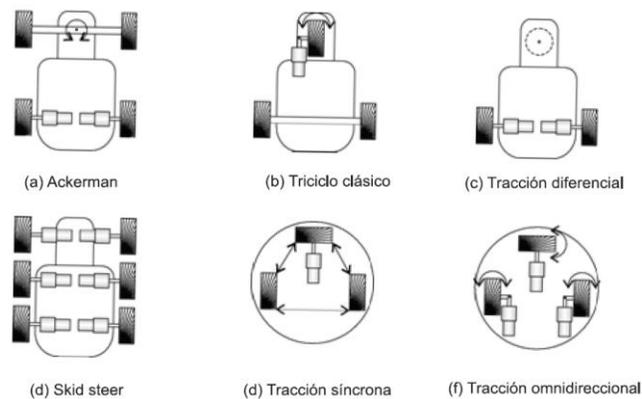


Figura 3. Configuraciones de los RMR

Fuente: (Barrientos, García, & Silva, 2007)

De acuerdo a la configuración cinemática, los Robots móviles con ruedas pueden ser diseñados con cuatro tipos diferentes de ruedas para su movimiento, a continuación, se listan los diferentes tipos de ruedas y se muestran en la figura 4.

- Omnidireccionales.
- Convencionales.
- Tipo castor.

- Rueda de bolas.



Figura 4. Tipos de ruedas.

Fuente: (Barrientos, García, & Silva, 2007)

2.1.5 Robots móviles omnidireccionales

El auge tecnológico de los últimos años ha generado gran interés de las industrias en cuanto a la robótica móvil causando un crecimiento exponencial debido a dos motivos.

- Estas plataformas son útiles en la robótica de servicio.
- Optimizan los procesos industriales, pues un robot manipulador tiene la posibilidad de desplazarse por todo el lugar de trabajo debido a que su movimiento omnidireccional le permite desplazarse por espacios reducidos.

En la Figura 5 se puede apreciar dos tipos de plataformas Kuka, que son ejemplos de esta clase de robots móviles omnidireccionales, en este caso utilizan cuatro ruedas omnidireccionales con rodillos periféricos, los cuales se equipan con varios tipos de brazos (Magnabosco, 2012).



Figura 5. Manipuladores móviles marca Kuka.

Fuente: (Magnabosco, 2012)

Las principales características de estos robots radican en el tipo y disposición de sus ruedas como se muestra en la Figura 6.

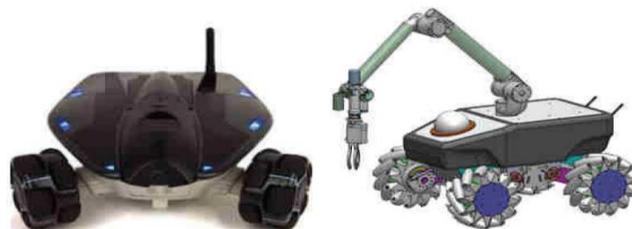


Figura 6. Estructura de un robot omnidireccional.

Fuente: (Zambrano, 2015)

Para posibilitar el desplazamiento de los robots omnidireccionales se utilizan actuadores, tales como los motores, motivo por el cual se constituye en su componente principal, además de permitir captar señales del ambiente por donde se desplazan (Zambrano, 2015).

2.1.6 Ruedas omnidireccionales

Como se menciona en párrafos anteriores, la rueda omnidireccional es un tipo de rueda que son usado generalmente en robots móviles con ruedas, basándose en un principio general que depende de la inclusión de rodillos alrededor de su periferia, esto le ayuda a aumentar un grado de libertad, facilitando su movilidad en el eje perpendicular al sentido de rodaje que tiene una rueda común y corriente (Martinez & Sisto, 2009)

La Figura 7 indica la configuración básica de una rueda omnidireccional (universal), diferenciándose cada una por su desplazamiento, posicionamiento, orientación, capacidad de carga. A continuación, se muestran diferentes tipos de ruedas omnidireccionales:

- Ruedas omnidireccionales simples
- Ruedas omnidireccionales dobles
- Ruedas Mecanum
- Rueda Esférica



Figura 7. a) Rueda omnidireccional universal, b) Ruedas omnidireccionales dobles, c) Ruedas Mecanum, d) Rueda Esférica
Fuente: (Zambrano, 2015)

○ **Ruedas omnidireccionales simples**

Se basa en una rueda principal que forma la estructura, al igual que una rueda común y de esta depende el avance, además los rodillos que se colocan de forma uniforme en el perímetro de la rueda principal dan origen a los movimientos laterales, los cuales tienen una curvatura que evitan los rebotes a medida que va avanzando, a continuación, se muestran las características que poseen:

- Presenta capacidad limitada de carga ya que los rodillos están situados en la periferia de la rueda principal, lo que le ayuda a soportar la totalidad del peso del robot.
- Tiene tres grados de libertad, lo que le ayuda al robot a efectuar movimientos en diversas direcciones sin requerir de rotaciones previas.
- La fricción generada por el rodillo al entrar en contacto con la superficie es baja.
- Los rodillos se comportan de manera similar a rueda convencional al efectuarse el desplazamiento lateral, así también tiene mayor sensibilidad a la superficie en relación a otro tipo de ruedas (Zambrano, 2015).

○ **Ruedas omnidireccionales dobles**

Las ruedas omnidireccionales dobles representan una variación de configuración general de una rueda simple, debido a que en estas se incorporan dos rodillos alternado en el perímetro de la rueda principal, tal y como se representa en la Figura 8, a continuación, se enuncian sus características:

- Posee gran estabilidad debido a que se aumenta la superficie de contacto.
- Tiene una elevada capacidad de carga en comparación a su predecesora (Martinez & Sisto, 2009).



Figura 8. Rueda omnidireccional doble

Fuente: (Zambrano, 2015)

○ Ruedas Mecanum

Su estructura es similar a la rueda universal, pero los rodillos se encuentran montados en un ángulo por lo general de $\pm 45^\circ$, en la Figura 7A y 7B se puede apreciar la rueda omnidireccional vista desde la parte inferior. En la Figura 9A visualiza la rueda mecanum con un ángulo de 45° (rueda izquierda), mientras en la 9B se aprecia que posee un ángulo de 45° pero negativo (rueda derecha), en la 9C se muestra la rueda mecanum actual (Ortega & Yapo, 2017).

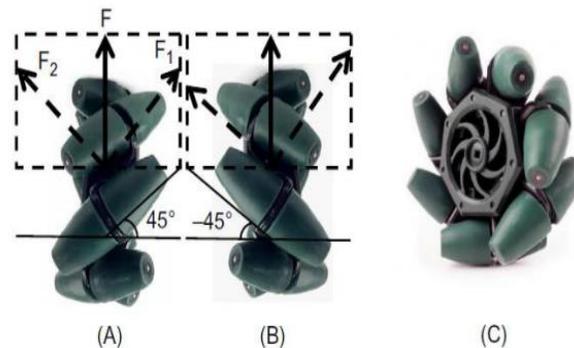


Figura 9. Rueda Mecanum Omnidireccional.

Fuente: (Ortega & Yapo, 2017)

La forma en la que están colocados los rodillos genera que la fuerza aplicada en el eje de la rueda central se divida en dos componentes, uno paralelo y el otro perpendicular al eje de los rodillos, las cuales se modifican según la orientación de los mismo (Ver Figura 10). Esta descomposición ayuda a que la rueda realice desplazamientos omnidireccionales, lo cual provoca una pérdida de fuerza en cualquier dirección que se desplace el vehículo (Zambrano, 2015).

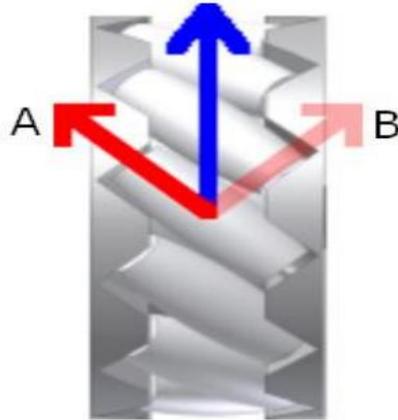


Figura 10. Componentes de la fuerza ejercida sobre la rueda Mecanum.
Fuente: (Martinez & Sisto, 2009)

○ Rueda Esférica

La rueda esférica se conforma por una esfera, la misma que se encuentra unida a un aro con rodillos. Estos rodillos le proporcionan un sentido de giro, lo que les ayuda a desplazarse omnidireccionalmente. Dichas características se pueden apreciar en la figura 11.

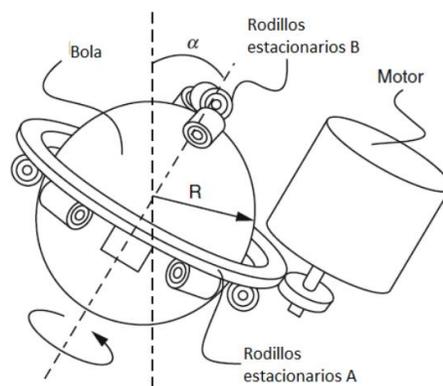


Figura 11. Rueda esférica.
Fuente: (Ramírez, 2016)

2.2 Tipos de robots omnidireccionales

Considerando la estructura y disposición de ruedas, las opciones más idóneas para análisis de robots omnidireccionales son las plataformas móviles de tres y cuatro ruedas.

2.2.1 Robots omnidireccionales de tres ruedas

La estructura de este robot se caracteriza generalmente por poseer tres ruedas y un chasis circular, la posición de las ruedas tiene una apertura de 120° entre ella. En este tipo de robots se pueden utilizar ruedas simples o dobles, las mismas que se pueden controlar por motores, tal y como se aprecia en la figura 12.

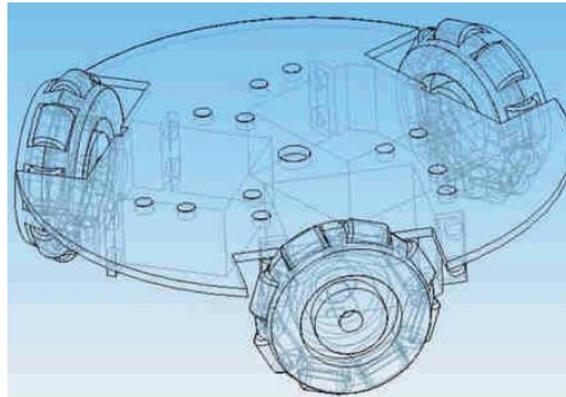


Figura 12. Estructura y disposición de un robot omnidireccional de tres ruedas.

Fuente: (Saénz, Santibañez, & Bugarin, 2016)

Este tipo de robot son uno de los más utilizados en distintas áreas, ya que pueden moverse en cualquier dirección y tiempo, es decir son robots móviles holonómicos por cuanto tienen la capacidad de modificar su dirección de forma inmediata.

Los robots omnidireccionales de tres ruedas presentan la ventaja de ser más pequeños que los de cuatro ruedas y por ello requieren de menos equipos, sin embargo, el principal inconveniente es tratar de controlar el movimiento para que este se desplace a una posición deseada con la disposición deseada. En la Figura 13 se muestra el diagrama esquemático de un robot de tres ruedas junto con sus ángulos y las direcciones donde L_i representa la distancia que existe desde el centro del robot al centro de cada rueda y α es el ángulo entre la dirección del robot y dirección de la primera rueda (Sharbafi, Lucas, & Daneshvar, 2010).

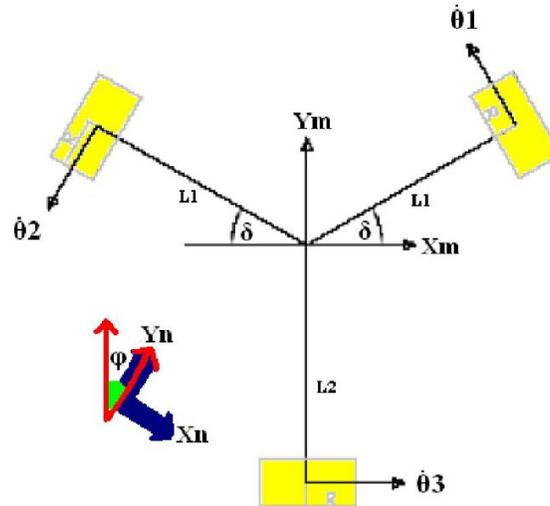


Figura 13. Modelo esquemático del robot de tres ruedas
Fuente: (Sharbafi, Lucas, & Daneshvar, 2010)

2.2.2 Robots omnidireccionales de cuatro ruedas

Los robots de cuatro ruedas utilizan una gran gama de ruedas no únicamente las simples y las dobles, así también se adiciona activos para incrementar los grados de libertad de cada rueda y los otros componentes facilitando la movilidad del robot por terrenos irregulares.

Los robots de cuatro ruedas que se destacan dentro de este tipo, son los siguientes:

- omnidireccionales circulares
- omnidireccionales de ruedas orientables.
- **Robot omnidireccional circular**

Representa una de las configuraciones utilizadas con mayor frecuencia en la fabricación de robots omnidireccionales, debido a que las ruedas se encuentran ubicadas en la periferia del robot, lo que le facilita la rotación del marco del robot como se muestra en la figura 14.

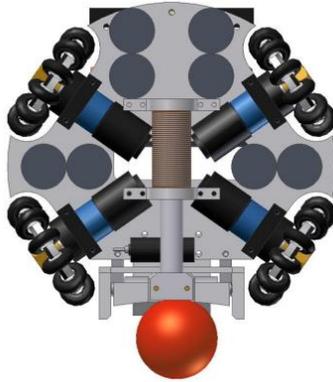


Figura 14. Robot omnidireccional circular de 4 ruedas.
Fuente: (Rojas, 2005)

En la configuración del robot omnidireccional de cuatro ruedas se presenta dos ejes de simetría como se puede apreciar en la Figura 15, en donde φ representa el ángulo de la rueda con respecto al eje horizontal (la dirección x). La suma de las fuerzas que actúan obedece a la posición correcta de la rueda (Rojas, 2005) .

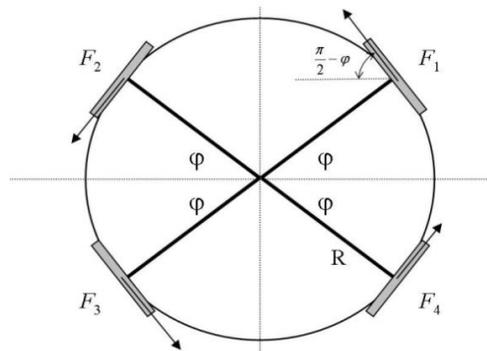


Figura 15. Disposición de las ruedas y distribución de las fuerzas
Fuente: (Rojas, 2005)

○ Robot omnidireccional Mecanum

La rueda Mecanum tiene como característica principal mantener un centro activo con un número de rodillos pasivos adheridos alrededor de su contorno en un ángulo de 45° como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Rueda Mecanum resistente montada en AuckBot
Fuente: (Xie, Scheifele, Xu, & Stol, 2015)

Los rodillos poseen una geometría curvada con la finalidad de que la forma de la rueda se conserve circular mientras la rueda de Mecanum se encuentra girando (Xie, Scheifele, Xu, & Stol, 2015).

2.3 Modelado cinemático del robot móvil

La cinemática se refiere al estudio del movimiento del robot de acuerdo a su geometría. El modelado cinemático puede ser utilizado como modelo matemático de partida para el diseño del controlador, además para establecer las ecuaciones de los cálculos de odometría y para simular el comportamiento cinemático del robot móvil.

Para la construcción del modelo cinemático es importante considerar las siguientes limitantes:

- El robot realiza su movimiento sobre una superficie plana.
- El robot no contiene elementos flexibles en su estructura (incluidas las ruedas).
- Las ruedas poseen uno o ningún eje de direccionamiento, teniendo en consideración que este último es generalmente perpendicular a la superficie (suelo).

- No se considera ningún tipo de fricciones en los elementos móviles del vehículo o contra el suelo (Pozo, 2012).

Tomando en cuenta la rigidez de la rueda, ésta entra en contacto con la superficie en un solo punto, que es el origen del sistema de referencias que se presenta en la Figura 17.

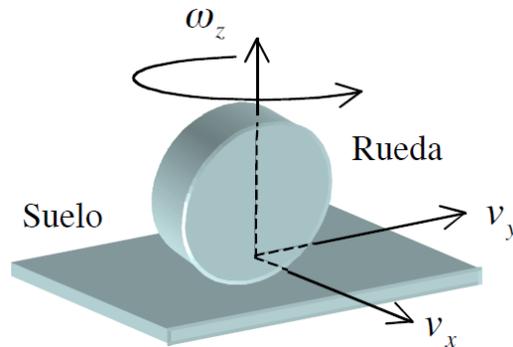


Figura 17. Rueda en contacto con la superficie
Fuente: (Pozo, 2012)

El modelo cinemático se fundamenta en el principio de que las ruedas al encontrarse en contacto con la superficie actúan como articulación plana de tres grados de libertad. Como se puede observar en la Figura 17, la dirección V_y representa el sentido normal de recorrido de la rueda, el V_x indica las traslaciones laterales, y ω_z la velocidad rotacional que se origina con el giro del robot. En definitiva, la cinemática directa pretende realizar el cálculo de la velocidad lineal y angular del vehículo en virtud del aporte de cada una de sus ruedas (Moya, 2017).

2.4 Percepción

El sistema de percepción le permite a la plataforma enfrentar situaciones cambiantes del entorno, así como de generar reacciones adecuadas ante cualquier evento que se presente durante su movimiento, por lo cual se requiere la utilización de un sistema sensorial que proporcione datos del entorno, los mismos que ayuden al robot realizar tres actividades específicas que son:

detectar obstáculos, mantener actualizado el mapa del entorno y precisar la posición y orientación del mismo.

Para determinar la posición y mapeo del entorno en el que se desplaza el vehículo omnidireccional se consideran las características de la precisión, resolución espacial, alcance; mientras que para detectar los obstáculos se requiere de tiempos muy pequeños entre cada observación, lo que ayuda a captar la información y procesarla de manera rápida. En la Figura 18 se presentan los tipos y ejemplos de estimadores de posición (González & Ollero, 2015).

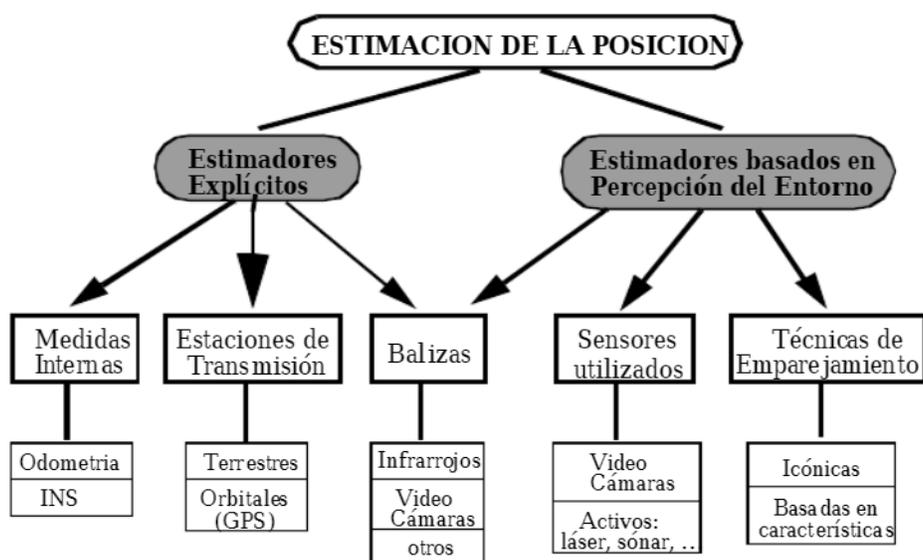


Figura 18. Cuadro resumen de los distintos sistemas de estimación de la posición.
Fuente: (González & Ollero, 2015)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente la plataforma móvil requiere de la combinación de varios sensores dentro del sistema sensorial. Por ejemplo, existen robots donde la actualización del mapa y la estimación de la posición se realizan por dispositivos como: cámaras de video, escáneres, láseres, sin embargo, los obstáculos son detectados por medio de sonares. Además, es fundamental resaltar la importancia que posee la estimación de la posición en la construcción del mapa del entorno en el que se mueve el robot (González & Ollero, 2015).

2.4.1 Clasificación Sensorial

La clasificación más utilizada en la robótica móvil son los sensores:

- Propioceptivos se relaciona con la percepción y análisis del estado interno de la plataforma omnidireccional, es decir, el nivel de carga de baterías, la posición del vehículo, la temperatura interna del robot, entre otros.
- Exteroceptivos se relaciona con la percepción y estudios de los aspectos externos del vehículo, entre ellos se encuentran, la temperatura del ambiente, presión, localización de objetos, entre otros (Arjonilla, 2011).

En la Tabla 1 se detallan los diferentes sensores exteroceptivos y propioceptivos existentes.

Tabla 1

Necesidades de la plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional de entornos cerrados

Sensores Exteroceptivos	Sensores Propioceptivos
Sensores para medir distancias basadas en ultrasonido	GPS
Sensores para medir distancias que funcionan en el espectro infrarrojo	Sensores para medir de forma absoluta la orientación del robot (brújula e inclinómetro)
Visión artificial	Giroscopio
Sensores de proximidad (Inductivos, efecto Hall, capacitivos)	Shaft Encoder incremental
Sensores de iluminación (fotoresistencias, fotodiodos y fototransistores)	Encoders absolutos
	Sensores de velocidad

Fuente: (Arjonilla, 2011)

2.5 Localización de un robot móvil

La plataforma debe tener la capacidad de desplazamiento por diversos entornos sin presentar inconvenientes y lograr el objetivo para el cual fue diseñado, esto se puede alcanzar por medio de pequeños programas que se basan en la odometría, los mismos que determinarán si el robot está realizando los movimientos adecuados.

Las aplicaciones de robots móviles requieren conocer su posición y orientación en tiempo real, es decir, un robot limpiador debe garantizar que el piso se encuentre limpio sin que se repitan los trayectos; pero la localización no limita únicamente en conocer su posición, sino que se requiere la resolución de problemas que se presenten al poner un robot móvil en un entorno desconocido y que el mismo vehículo pueda construir de forma exponencial un mapa conforme al ambiente, además el mismo mapa es utilizado para ubicar su propia posición. De estos fundamentos nace la localización o mapeo simultáneos o SLAM por sus siglas en inglés (López & Bermúdez, 2013).

2.6 Localización y mapeado simultáneo SLAM

El término SLAM proviene de las palabras *Simultaneous Localization and Mapping*. Hugh Durrant-Whyte y John J. Leonard desarrollaron el SLAM que se centra en el problema de construir un mapa en un entorno desconocido para una plataforma móvil.

Se puede dividir el problema SLAM en varias partes:

- Extracción de Landmarks
- Asociación de datos
- Estimación del estado
- Actualización del estado

- Actualización de Landmarks

El método que se emplea generalmente para el desarrollo de este proceso es el EKF o filtro extendido de Kalman.

2.6.1 Landmarks

Los Landmarks representan puntos propios del entorno, los mismos que deben ser observados y reconocidos por la cámara del dispositivo móvil, dichos puntos de referencia son utilizados para establecer la localización de la plataforma omnidireccional dentro del entorno de desplazamiento.

Es necesario que los Landmarks se observen desde diversos enfoques y ángulos, además estos puntos deben ser únicos para que se puedan identificar fácilmente, teniendo como resultado que el algoritmo determine si se trata de un punto que ya se ha considerado o un punto nuevo de referencia, así también se requiere que estas referencias se encuentren estáticas y tener un tamaño que ayuden a realizar referencias (López P., 2016).

2.6.2 Asociación de datos

Hace referencia a las imágenes que se han obtenido y sus respectivos landmarks, lo cual se constituye en un elemento esencial al momento de realizar el posicionamiento a través de la ubicación de una referencia obtenida.

2.6.3 Estimación y actualización del estado

Una vez captados y validados los puntos de referencia, estos se encuentran relacionados con los correspondiente landmarks que están guardados en la base de datos, por medio de este procedimiento se obtiene dos puntos cercanos, los cuales deben ser analizados para ver si

corresponden al mismo punto o se trata de una referencia distinta. Si resulta ser el mismo punto, su landmark correspondiente incrementa el número de ocasiones que ha sido detectada durante el desplazamiento del dispositivo móvil reduciendo el error de referencia, es decir, al punto de referencia que no posee coincidencias se le asigna un landmark a la espera de encontrar una concurrencia durante el desplazamiento (López P., 2016).

2.6.4 Diagrama de procesos del algoritmo SLAM

El proceso SLAM tiene como finalidad actualizar la posición del vehículo móvil en el entorno. Las medidas de odometría son las que proporcionan la posición del robot, sin embargo, en muchos casos son equivocadas, motivo por el cual se requiere equipar de medidas de distancia para corregir la posición. Una vez que se tiene la posición de Landmarks se puede restablecer la posición realizando el cálculo de la distancia actual de dichas marcas en cada periodo de tiempo (González A. , 2016).

El esquema del proceso o filtro EKF- SLAM se indica en la Figura 19. Durante este proceso el filtro se encarga, en primera instancia, de asignar fiabilidad a los sensores de medida al modelo, con la utilización de las matrices de covarianza del error. En relación a ello se expresa que mientras más preciso sea el sensor, los valores de la matriz serán menores. En cada periodo de tiempo el filtro tiene la función de medir la distancia a las landmarks e ir actualizando la información.

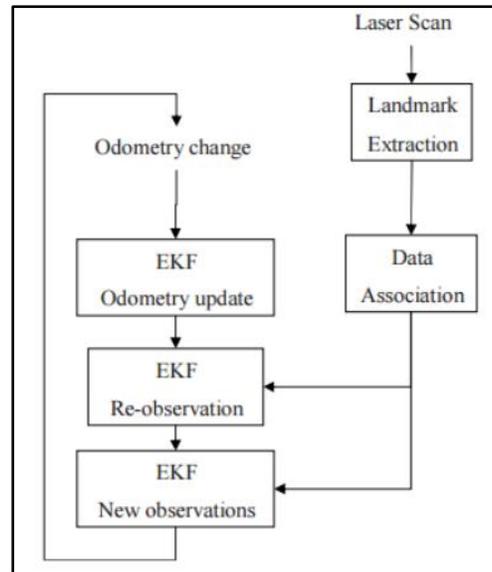


Figura 19. Diagrama EKF-SLAM
Fuente: (González A. , 2016)

2.6.5 Representación de mapas

Para la presentación y generación de mapas de entornos que se originan por medio del desplazamiento de la plataforma móvil se puede apreciar dos tipos distintos de mapeos los cuales son:

- Mapeo denso. - son aquellos mapeos donde se analiza y se realiza una evaluación de la correspondencia de la totalidad de los píxeles de la imagen. Este método permite calcular la disparidad de cada uno de los píxeles.
- Mapeo disperso. - son aquellos mapeos que toman como base ciertos puntos de interés posicionados en la imagen almacenada y se encuentra su correspondencia par y de esa forma establecer la distancia y profundidad que existe con respecto al sistema de cámaras (López P., 2016).

2.6.6 Software para la localización y mapeado simultaneo SLAM

ROS es un sistema operativo robótico de código abierto definido como un framework, el mismo que se caracteriza por ser un entorno de trabajo con un gran número de herramientas, paquetes y librerías que se diseñaron para crear diversas aplicaciones robóticas.

Dentro de la plataforma ROS se cuenta con los siguientes métodos de mapeo simultáneo SLAM mostrados a continuación:

- RTAB-Map
- ORB-SLAM
- LSD-SLAM
- RGB-D SLAM

Las técnicas SLAM mostradas anteriormente facilitan dos tipos de mapeo, los cuales son: RTAB-Map y RGB-D SLAM que utilizan mapeo denso y ORB-SLAM que emplea mapeo disperso (López P., 2016).

2.7 Resumen

Las plataformas robóticas móviles son dispositivos electrónicos que se diseñan con la finalidad de realizar desplazamientos en diversos espacios, motivo por el cual presentan múltiples aplicaciones que necesitan cada vez mayor autonomía por parte del dispositivo, lo que facilita la operatividad del robot omnidireccional y genera mayores beneficios para las personas que lo utilizan.

Se puede diferenciar que existen diversos tipos de estructuras de robots omnidireccionales, los cuales se clasifican de acuerdo a la cantidad de ruedas que poseen y su disposición, teniendo en

cuenta que las más utilizadas son plataformas de tres y cuatro ruedas debido a que poseen características como control simple, estabilidad y tracción.

La cinemática de plataformas móviles omnidireccionales se refiere a los diferentes desplazamientos del robot partiendo de su geometría, mismos que genera un modelo matemático que permiten determinar las ecuaciones que predicen y simulan el comportamiento cinemático del robot.

Para tener la percepción del entorno, los robots móviles hacen uso de sensores que se encargan de entregar señales eléctricas que con la utilización de microprocesadores se estandarizan, lo cual ayuda a medir diferentes factores del medio que rodea a dicho robot, el tipo de información dependerá de la clase de sensor utilizado.

La localización y mapeo simultáneo SLAM es un método que se utiliza en dispositivos electrónicos móviles, que pueden ser teleoperados o autónomos, con el fin de construir un mapa de un entorno, sea este conocido o desconocido por el cual se desplaza, además que evalúa su trayectoria al moverse dentro de este espacio.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL SISTEMA

3.1. Parámetros de diseño de la plataforma móvil

Este capítulo detalla el diseño de una plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional fiable de ambientes cerrados utilizando tecnología SLAM 3D en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

Mediante la creación de tablas comparativas se presentan ventajas y desventajas de cada elemento propuesto para la construcción del vehículo omnidireccional. Para esta selección se tomó en cuenta las principales necesidades, especificaciones técnicas y demás parámetros necesarios para seleccionar los mejores componentes que permiten un desarrollo óptimo.

3.2. Definición de necesidades

El proyecto requiere de varias características esenciales a la hora del cumplimiento de los objetivos trazados, por tal razón es importante definir las necesidades en el desarrollo del vehículo omnidireccional para posteriormente analizarlas e interpretarlas, de esa manera satisfacer los requerimientos técnicos de la plataforma móvil.

Se muestran los puntos claves correspondientes a los requerimientos del diseño especificados en la tabla 2, logrando así establecer los componentes más idóneos para un funcionamiento correcto de la plataforma.

Tabla 2

Necesidades de la plataforma móvil omnidireccional para la generación tridimensional de entornos cerrados

N°	Requerimientos
1	desplazarse en cualquier dirección
2	diseño en función de la carga útil
3	desplazarse con velocidad idónea para generar mapas 3D a medida que se moviliza
4	control de forma automática y manual
5	uso de tecnología de código libre
6	tiene autonomía energética
7	posee sistema inalámbrico de comunicación
8	permite la adquisición y lectura de datos, además de visualización remota de resultados

3.3. Definición de especificaciones

En la tabla 3 se detallan los requerimientos de la plataforma móvil omnidireccional para cumplir con los objetivos del proyecto.

Tabla 3

Métricas de las necesidades para el robot omnidireccional

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
1,2,3	Forma de la plataforma	Hexagonal	----
1,2,3	Altura máxima	Altura < 700	Mm
1,2,3,6	Velocidad máxima	Velocidad > 10	cm/s
2	Peso máximo de carga	Peso < 10	Kg
1,2,3,6	Peso máximo de la plataforma	Peso < 10	Kg
6	Voltaje de operación	12	V
1,2,3,4,6	Cantidad de Motores	3	Unidades
5	Tipo de código	Abierto	----
7,8	Visualización Mapeo	Acceso remoto desde Pc.	----
7	Sistema de Comunicación	Inalámbrico	----
4,5,7	Modo de operación	Manual- Automático	----

Las necesidades y requerimientos descritos se miden físicamente en su análisis, estableciendo métricas que permitan medir el grado de cumplimiento de los objetivos trazados.

3.4. Definición de subsistemas

Para una ejecución de productos se requiere cubrir de manera óptima las necesidades de los clientes (Ulrich & Eppinger, 2012), descomponiendo un problema grande en problemas pequeños y sencillos de resolver o también llamados subsistemas, la figura 20 muestra el esquema de funcionamiento del robot omnidireccional. El manejo de una tarjeta embebida que trabaje como base de procesamiento de datos, comprime la complejidad del sistema, y permite la creación de subsistemas, observados en la figura 21.

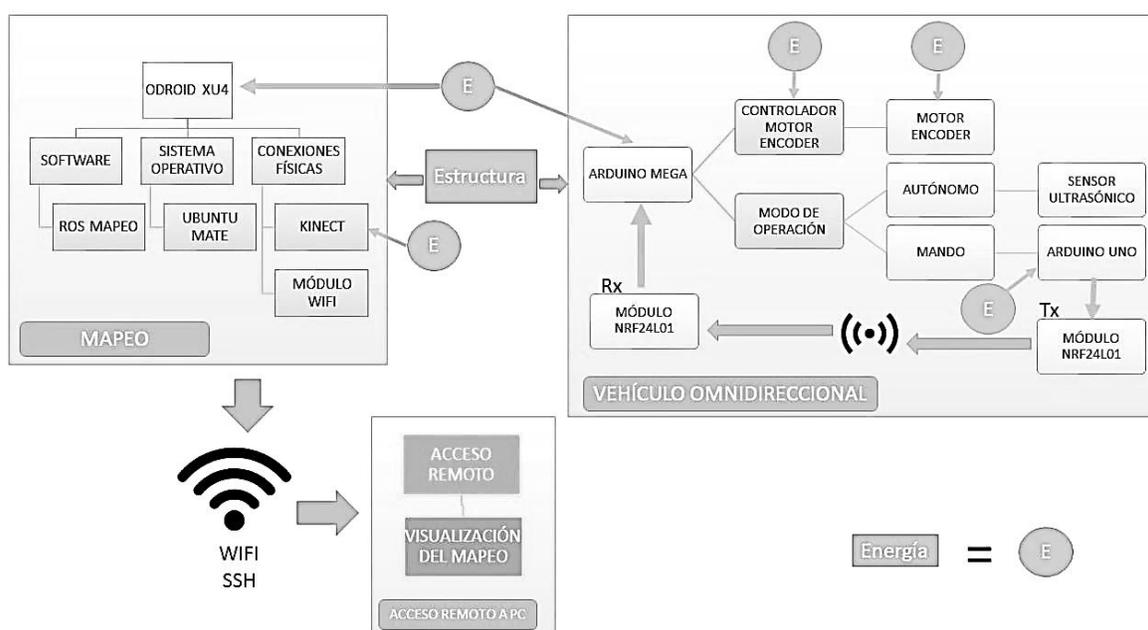


Figura 20. Esquema de la función del robot omnidireccional

Al desglosar el esquema de la plataforma móvil omnidireccional de la figura 20 se crean 5 subsistemas como se observa en la figura 21, para analizar las características que debe tener cada uno de ellas, estas se enuncian en la tabla 4:

Tabla 4
Subsistemas del robot omnidireccional

N°	Subsistema
1	Estructura
2	Energía
3	Mapeo
4	Vehículo omnidireccional
5	Acceso remoto PC

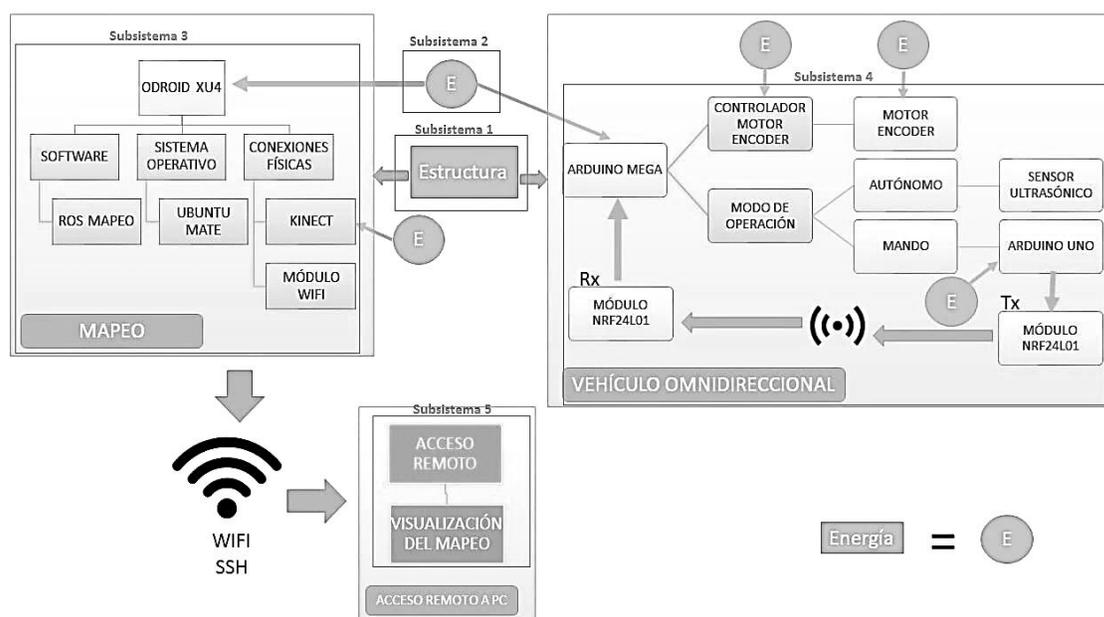


Figura 21. Subsistemas de la plataforma omnidireccional

3.4.1. Subsistema 1: Estructura

La estructura del robot es la manera en la que se pretende organizar un sistema, es donde va estar alojado cada uno de los subsistemas en estudio y todos los elementos del proyecto. Es indispensable su forma para el acatamiento de los objetivos.

3.4.2. Subsistema 2: Energía

El subsistema de Energía es la fuente donde se va a distribuir y abastecer la energía para el funcionamiento de cada uno de los elementos del sistema y por ende el robot en su totalidad.

3.4.3. Subsistema 3: Mapeo y Localización

El subsistema de mapeo es aquel que permite saber dónde se encuentra y hacia donde se va a dirigir el robot, siendo fundamental para la navegación, desplazamiento con respecto a un punto de referencia y conocer el lugar donde se sitúa.

3.4.4. Subsistema 4: Vehículo omnidireccional

El subsistema de vehículo omnidireccional es el de mayor amplitud, porque ocupa mayor espacio al tener más componentes para el correcto funcionamiento del robot, gracias a este subsistema el robot puede desplazarse omnidireccionalmente de un lugar a otro, según como recepta la señal cada uno de los motores, así como también establece la odometría del robot.

3.4.5. Subsistema 5: Acceso remoto PC

Este subsistema permite acceder de forma inalámbrica a la tarjeta encargada del procesamiento de la información, para esto se establece la interacción remota desde un computador en donde se visualiza el mapeo realizado por el robot omnidireccional.

3.5. Evaluación y selección

Al realizar un análisis profundo de cada uno de los subsistemas y evaluando los requerimientos de los usuarios se podrá establecer alternativas óptimas que permitan cumplir con el funcionamiento deseado, además se tomará en cuenta la organización estratégica de los

componentes para una equilibrada distribución de peso, siendo de gran importancia en el cumplimiento de los objetivos.

Para ponderar cada uno de los elementos planteados se utilizará el método ordinal corregido de criterios ponderados, el cual se basa en los criterios, que se indica en la tabla 5:

Tabla 5
Calificación para tablas de ponderación

N°	Descripción
1	Si el criterio de las filas es superior que el de las columnas
0,5	Si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas
0	Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas

Primero se realiza una tabla de ponderación con parámetros para elegir los elementos correctos, posterior se escoge dos o tres alternativas con el objetivo de análisis y ponderación para cada uno de los criterios establecidos al inicio.

Finalmente se realiza una tabla final, donde se ubican valores numéricos resultantes de las tablas con los resultados de cada uno de los elementos.

3.5.1. Subsistema 1: Estructura

Para la selección de este subsistema se tomó en cuenta los requerimientos necesarios para establecer la forma de la estructura, teniendo en cuenta que debe contener y fijar los componentes electrónicos sobre la misma, además el diseño debe ser ergonómico y funcional.

a. Alternativas de Estructura

Continuando con la ponderación de las alternativas para definir la estructura más idónea, se consideró tres puntos importantes para su selección, estas son:

- Movilidad
- Diseño
- Precio

En la tabla 6 se realiza la ponderación de los 3 factores principales dentro del subsistema estructura.

Tabla 6

Ponderación de parámetros para seleccionar el tipo de estructura

CRITERIO	Movilidad	Diseño	Precio	$\xi+1$	Ponderación
Movilidad		0	1	2	0,285
Diseño	1		1	3	0,43
Precio	0,5	0,5		2	0,285
			Total	7	1

Una vez obtenidas las ponderaciones de los criterios de evaluación, se analizan las alternativas de solución al subsistema estructura

- **Alternativa 1: Estructura de forma Hexagonal:** La estructura de tipo hexagonal proporciona mayor robustez y estabilidad al vehículo omnidireccional, además de proporcionar el espacio necesario para contener varios componentes electrónicos y poseer capacidad media de esquivar obstáculos.
- **Alternativa 2: Estructura de forma Triangular:** La estructura triangular proporciona mayor facilidad al momento de esquivar obstáculos, posee menor estabilidad y tiene menor espacio para sujetar componentes electrónicos.
- **Alternativa 3: Estructura de forma Circular:** La estructura circular facilita la navegación en espacios donde exista la aparición de obstáculos, posee robustez mediana y proporciona amplio espacio para contener varios componentes electrónicos.

A continuación, se presenta las alternativas para ser ponderadas con respecto a lo mencionado anteriormente:

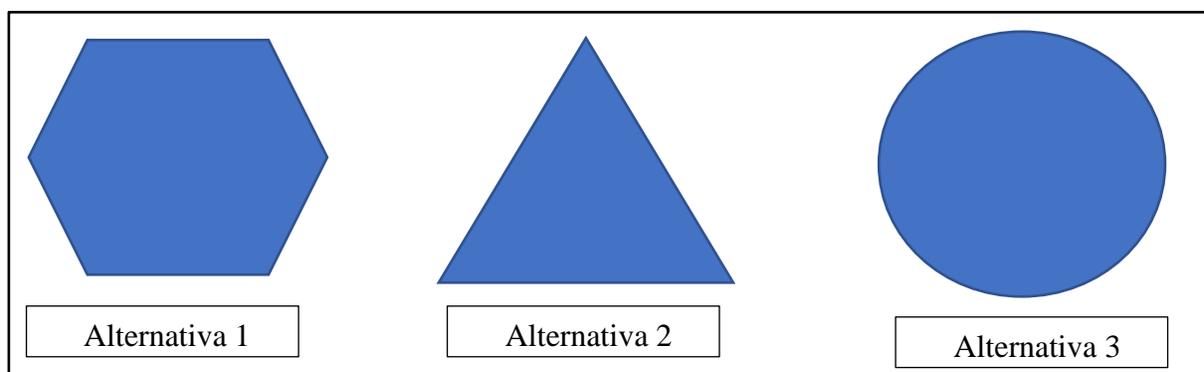


Figura 22. Alternativas de forma para selección de la estructura

b. Ponderación y selección de estructuras

A continuación, se irá analizando desde la tabla 7 hasta la tabla 9 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos, mostrados a continuación.

Tabla 7

Alternativas de forma para selección de la estructura

MOVILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	2	0,285
Alternativa 2	0,5		0,5	2	0,285
Alternativa 3	1	1		3	0,43
			Total	7	1

Tabla 8

Ponderación con respecto al Diseño

DISEÑO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0,5		1,5	0,25
			Total	6	1

Tabla 9*Ponderación con respecto a la Movilidad*

PRECIO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,43
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,21
Alternativa 3	0,5	1		2,5	0,36
Total				7	1

Una vez realizado las ponderaciones, en la tabla 10 se muestra la ponderación total, la cual permite conocer la forma idónea que debe tener la estructura de la plataforma omnidireccional, como lo indica la siguiente tabla:

Tabla 10*Ponderación final y selección de la forma de la estructura*

CRITERIO	Movilidad	Diseño	Precio	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,285*0,4	0,5*0,3	0,43*0,3	0,393	1
Alternativa 2	0,285*0,4	0,25*0,3	0,21*0,3	0,252	3
Alternativa 3	0,43*0,4	0,25*0,3	0,36*0,3	0,355	2

c. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Al ponderar cada una de las formas de las estructuras planteadas, se puede apreciar que la alternativa 1 tienen un porcentaje de prioridad respecto al resto de alternativas. Esta forma hexagonal colaborará al correcto desplazamiento del vehículo.

3.5.2. Subsistema 2: Energía

Este subsistema es uno de los más importantes porque abastece de energía al vehículo móvil omnidireccional, razón por la que se requiere una minuciosa búsqueda de la batería, que deberá entregar el voltaje y corriente necesario para el correcto desempeño de la plataforma móvil.

Para esta selección se consideran los siguientes factores que representan las características más relevantes a tomar en consideración para establecer la batería más idónea, estas son:

- Capacidad de almacenamiento
- Confiabilidad
- Portabilidad

Tabla 11*Ponderación de parámetros para seleccionar una batería*

CRITERIO	Capacidad de almacenamiento	Confiabilidad	Portabilidad	$\xi+1$	Ponderación
Capacidad de almacenamiento		0,5	1	2,5	0,42
Confiabilidad	0,5		0,5	2	0,33
Portabilidad	0	0,5		1,5	0,25
			Total	6	1

Como se puede observar en la tabla 11, el parámetro capacidad de almacenamiento es el que está ponderado con mejor puntuación, por la importancia en la entrega de tensión y corriente proporcionada por la batería, además del tiempo de duración.

a. Alternativas de baterías:

En el mercado hay una variedad de baterías por ello se ha tomado en cuenta las más utilizadas en desarrollo de sistemas electrónicos, a continuación, se presentan las siguientes alternativas:

- **Alternativa 1: Baterías de ion-litio:** Las baterías de litio con respecto a las baterías convencionales poseen las características de descarga total es decir el 100%. Otra característica importante es la significativa reducción de peso comparada con otro tipo de baterías, por lo que se ha convertido en la solución adecuada al momento del desarrollo de tecnología.
- **Alternativa 2: Baterías Secas:** Las baterías secas o llamadas también baterías de celda seca son uno de los tipos más comúnmente utilizadas en aplicaciones

electrónicas, posee varias presentaciones como AA, 9 voltios, baterías de reloj, entre otras.

En las tablas 12 y 13 se muestran las ventajas y desventajas que presentan cada una de las alternativas seleccionadas.

Tabla 12

Ventajas y desventajas de una batería de Ion-Litio

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Costo	Selladas no requieren mantenimiento	Costo de adquisición moderado
Documentación	Tecnología conocida	No posee
Adquisición	Alta Disponibilidad (tamaño diseño, cantidad)	No posee
Temperatura	Amplio rango de temperaturas de operación	Degradación a altas temperaturas
Voltaje de Celdas	Celdas de voltaje elevado, larga vida útil	No posee
Peso	Acumuladores ligeros de pequeño tamaño y forma variada	No posee
Impacto medioambiental	Los Componentes pueden ser reciclados	Posible amenaza medio ambiental debido a la masiva utilización de este tipo de batería

Tabla 13

Ventajas y desventajas de las baterías secas

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Costo	Bajo costo	No posee
Documentación	Tecnología conocida	No posee
Adquisición	Alta Disponibilidad (tamaño diseño, cantidad)	No posee
Temperatura	Buen desempeño en altas y bajas temperaturas	Expuesto a exceso de calor Puede romperse y explotar
Voltaje de Celdas	Celdas de voltaje elevado	No posee
Peso	Por sus características de peso	No posee

CONTINÚA



este tipo de baterías son utilizadas en
múltiples aplicaciones

Impacto medioambiental

Larga vida útil

Alta contaminación

b. Ponderación y selección de las baterías

Con los parámetros seleccionados, a continuación, se procede a realizar la ponderación de cada una de las baterías y seleccionar la más idónea.

A continuación, se irá analizando desde la tabla 14 hasta la tabla 17 las ponderaciones respecto a los parámetros establecidos.

Tabla 14

Ponderación de las baterías en base a la precisión

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
		Total	3	1

Tabla 15

Ponderación de las baterías en base a la confiabilidad

CONFIABILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,5
Alternativa 2	1		2	0,5
		Total	4	1

Tabla 16

Ponderación de las baterías en base a su portabilidad

PORTATIBILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
		Total	3	1

Tabla 17*Ponderación final y selección de la fuente de energía*

CRITERIO	Capacidad	Confiabilidad	Portabilidad	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,33*0,4	0,50*0,3	0,33*0,3	0,381	1
Alternativa 2	0,67*0,4	0,50*0,3	0,67*0,3	0,619	2

c. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Al ponderar cada uno de las alternativas seleccionadas para el abastecimiento de energía del vehículo omnidireccional se nota claramente la ventaja que obtienen las baterías secas, las misma que poseen las características más idóneas para la construcción del robot móvil.

3.5.3. Subsistema 3: Mapeo y Localización

El subsistema de Mapeo y localización es uno de los componentes de mayor relevancia dentro de la plataforma móvil omnidireccional, para esto se utiliza la tecnología SLAM, que permite realizar mapeos en tres dimensiones, el vehículo omnidireccional al moverse capta el entorno por donde se desplaza. En este subsistema se encuentran dos dispositivos esenciales para funcionamiento correcto del robot móvil, estos son:

- Sensores 3D
- Microprocesadores

a. Sensores 3D

Los sensores 3D o también denominados cámaras Depth, Ranging y RGB-D, son dispositivos que tienen una singular presencia en entornos lúdicos donde la interacción es alta y utiliza diferentes fuentes de información. Gracias a factores como el bajo costo y su gran capacidad tecnológica, ha permitido dar lugar a nuevos artefactos y aplicaciones, siendo el mapeo 3D

mediante cámaras RGB-D la tecnología que presenta mayores beneficios al implementar en vehículos omnidireccionales.

Para la selección de los sensores 3D se establece los siguientes parámetros los cuales son considerados los más importantes, en la tabla 18 se realiza la ponderación de los parámetros seleccionados:

- Precisión
- Sensibilidad
- Compatibilidad

Tabla 18

Ponderación de las tecnologías para elección del mapeo y localización

CRITERIO	Precisión	Sensibilidad	Compatibilidad	$\xi+1$	Ponderación
Precisión		1	0	2	0,4
Sensibilidad	0		0,5	1,5	0,3
Compatibilidad	0	0,5		1,5	0,3
			Total	5	1

Una vez realizada la ponderación de criterios, la precisión del sensor 3D es indispensable para realizar correctamente la captura de ambiente.

a1. Alternativas de Sensores

Se eligió tres sensores de similares características para ser compararlos entre sí y seleccionar al más idóneo, estos son:

- **Alternativa 1: Sensor Kinect XBOX 360:** El Kinect es un dispositivo que integra sensor de profundidad, cámara RGB, micrófono y sensor de infrarrojos, razón por la cual es capaz de capturar objetos, reconocerlos y situarlo en el plano.

- **Alternativa 2: Asus Xtion Pro live:** Proporciona una exclusiva solución sensible al movimiento y los colores (RGB), además permite el desarrollo de proyectos basados movimiento y voz, cabe mencionar que este sensor cuenta con herramientas para facilitar la creación de aplicaciones basadas en movimiento.
- **Alternativa 3: RealSense 3D de Intel:** Es una cámara 3D de largo alcance, dentro de sus principales aplicaciones están la robótica, equipos de realidad aumentada y otros dispositivos inteligentes. Dentro de sus principales funciones están la detección de profundidad IR en color y Full HD.

En las tablas 19, 20 y 21 se presentan las ventajas y desventajas de los sensores 3D propuestos mostrados a continuación:

Tabla 19
Ventajas y desventajas del Sensor Kinect

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Rango de Profundidad	Posee un rango para la captación de profundidad es alto 0,8 a 4 metros	Disminuye el rango de captación en operación
Precio	Es fácil de adquirir y costo moderado	No posee
Motor de inclinación	La cámara está equipada con un motor que inclina arriba o abajo la cámara ± 27 grados dando la capacidad de abarcar mayor área.	No posee
Interfaz de Datos	La conexión se hace mediante USB 2.0	Posee limitantes en la cantidad de información que se puede procesar por segundo, respecto a USB 3.0
Sistema operativo	Es compatible con Windows, Linux, Android	No posee
Detección de Cuerpos	Capacidad para detectar 6 personas	Se pueden rastrear 2 personas completamente
Sensor	RGB, IR, array de 4 micrófonos	No posee
Dimensión	Posee tamaño compacto 28 x 7,6 x 7,6 cm y peso ligero 1,4 kg	No posee

Tabla 20
Ventajas y desventajas del Sensor Asus Xtion Pro Live

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Rango de Profundidad	Posee un rango para la captación de profundidad es alto 0,8 a 3,5 metros	Disminuye el rango de captación en operación
Precio	Es fácil de adquirir, el costo tiende a ser alto	No posee
Motor de inclinación	No posee	Debe ser implementado de ser necesario
Interfaz de Datos	La conexión se hace mediante USB 2.0	Posee limitantes en la cantidad de información que se puede procesar por segundo, respecto a USB 3.0
Sistema operativo	Es compatible con Windows, Linux, Android	No posee
Detección de Cuerpos	Detección de cuerpo entero ideal para el desarrollo de juegos	Número reducido de cuerpos a detectar
Sensor	RGB, IR, array de 2 micrófonos	No posee
Dimensión	Posee tamaño compacto 18 x 3,5 x 5 cm y peso ligero 0,54 Kg	No posee

Tabla 21
Ventajas y desventajas del Sensor RealSense 3D de Intel

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Rango de Profundidad	Posee un rango para la captación de profundidad es alto 0,5 a 3,5 metros	Disminuye el rango de captación en operación
Precio	Es fácil de adquirir y costo moderado	No posee
Motor de inclinación	No posee	Requiere implementación de ser necesario
Interfaz de Datos	La conexión se hace mediante USB 3.0	No posee
Sistema operativo	Es compatible con Windows, Linux	No posee soporte en otras plataformas
Detección de Cuerpos	Capacidad para detectar cuerpos es moderada.	Requiere mejorar la capacidad de detección
Sensor	RGB, 2 IR	No posee
Dimensión	Posee tamaño compacto 13 x 2 x 0,7 cm y peso ligero	No posee

a2. Ponderación y selección de los sensores

A continuación, se irá analizando desde la tabla 22 hasta la tabla 25 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 22

Ponderación para evaluar los sensores en base a la precisión

PRECISIÓN	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	2,5	0,42
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	1		2	0,33
			Total	6	1

Tabla 23

Ponderación para evaluar los sensores en base al costo

SENSIBILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0,4
Alternativa 2	0		0	1	0,2
Alternativa 3	0,5	0,5		2	0,4
			Total	5	1

Tabla 24

Ponderación para evaluar los sensores en base a la compatibilidad

COMPATIBILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,55
Alternativa 2	0		0	1	0,18
Alternativa 3	0	0,5		1,5	0,27
			Total	5,5	1

Tabla 25

Ponderación final y selección del sensor

CRITERIO	Precisión	Sensibilidad	Compatibilidad	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,42*0,4	0,4*0,3	0,55*0,3	0,453	1
Alternativa 2	0,25*0,4	0,2*0,3	0,18*0,3	0,214	3
Alternativa 3	0,33*0,4	0,4*0,3	0,27*0,3	0,333	2

a3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Al realizar la ponderación de los sensores seleccionados la alternativa que obtuvo mayor porcentaje fue el sensor kinect, quien cuenta con las características idóneas para detectar el ambiente por donde se desplaza el vehículo omnidireccional.

b. MICROPROCESADORES

Para la selección del microprocesador hay que tener en cuenta la compatibilidad con el sensor, además se busca alto procesamiento de los datos obtenidos, para ello se consideró tres parámetros necesarios, estos son:

- Tamaño
- Velocidad de procesamiento
- Costo

Tabla 26

Ponderación de criterios de evaluación para los ordenadores de placa

CRITERIO	Tamaño	Velocidad de procesamiento	Costo	$\xi+1$	Ponderación
Tamaño		0,5	0	1,5	0,3
Velocidad de procesamiento	0,5		1	2,5	0,5
Costo	0	0		1	0,2
			Total	5	1

Como se muestra en la tabla 26 se ponderó con mayor porcentaje a la velocidad de procesamiento, siendo una característica muy importante a tomar en cuenta para la elección de la placa.

b1. Alternativas de microprocesadores

Se eligió tres microprocesadores de características similares que puedan cumplir con las funciones que necesita el vehículo omnidireccional, estos son:

- **Alternativa 1: ODROID:** Es una nueva generación de dispositivos informáticos con un hardware potente y eficiente energéticamente, además posee tamaño pequeño ideal para aplicaciones investigativas.
- **Alternativa 2: UP BOARD:** Es una placa en miniatura con alto rendimiento y bajo consumo de energía.
- **Alternativa 3: RASPBERRY Pi3:** Es un mini ordenador de pequeño tamaño, bajo coste y bajo consumo.

En las tablas 27, 28 y 29 se presentan las ventajas y desventajas de los microcontroladores propuestos mostrados a continuación:

Tabla 27
Ventajas y Desventajas del ODROID

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Procesador	Posee un CPUs Samsung Exynos5422 Cortex™-A15 2Ghz y Cortex™-A7 Octacore con GPU Mali-T628 MP6	Requiere seguir aumentando la capacidad de procesamiento
Memoria	Posee 2GByte LPDDR3 RAM	No es posible aumentar el tamaño
Capacidad de Almacenamiento	8GB / 16GB / 32GB / 64 GB eMMC y microSD	Adquisición de accesorios por separado
Usb	Dispones de un puerto USB 2.0 y dos puertos USB 3.0.	Si se requiere más puertos es necesario un hub USB externo
Sistema operativo	Soporta Android y Ubuntu	No presenta
Gráficos	Admite 1080p mediante cable HDMI	Únicamente posee puerto HDMI
Wifi	Posee USB IEEE 802.11b / g / n WLAN 1T1R con antena	Requiere de módulo Wifi USB externo
Dimensión	Posee tamaño compacto de 83 x 58 x 20 mm	No posee

Tabla 28
Ventajas y Desventajas del UP BOARD

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Procesador	Posee un procesador Intel® Atom™ x5-Z8350 (caché de 2M, hasta 1.92 GHz)	Requiere seguir aumentando la capacidad de procesamiento
Memoria	Posee 2GB / 4GB incorporada DDR3L-1600	No es posible aumentar el tamaño
Capacidad de Almacenamiento	16GB / 32GB / 64 GB EMMC	No es posible aumentar el tamaño
Usb	Dispones dos puertos USB 2.0 y un puerto USB 3.0.	Si se requiere más puertos es necesario un hub USB externo
Sistema operativo	Soporta Microsoft, Linux, Android	No presenta
Gráficos	Intel® HD 400 Graphics	Únicamente posee puerto HDMI
Wifi	Posee WiFi 802.11 b/g/n @ 2.4 GHz	Requiere de módulo Wifi USB externo
Dimensión	Posee tamaño compacto de 56.50 mm × 66 mm	No posee

Tabla 29
Ventajas y Desventajas del Raspberry Pi 3

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Procesador	ensambla en su circuito un chipset Broadcom BCM2387 con cuatro núcleos ARM Cortex-A53 a 1.2 GHz	Requiere seguir aumentando la capacidad de procesamiento
Memoria	Posee 1GB LPDDR2	Capacidad de memoria limitada respecto a otras placas
Capacidad de Almacenamiento	Dispone ranura microSD	Requiere adquirir el dispositivo por separado
Usb	Dispones cuatro puertos USB 2.0	Si se requiere más puertos es necesario un hub USB externo
Sistema operativo	Soporta Microsoft, Linux, Android	No presenta
Gráficos	1080p30 H.264 de alto perfil de decodificación.	Únicamente posee puerto HDMI
Wifi	Posee WiFi 802.11 b / g / n integrado	No posee
Dimensión	Posee tamaño compacto de 85 x 56 x 17 mm	No posee

b2. Ponderación y selección de los microprocesadores

Para la elección de los microprocesadores se realiza tablas de ponderación en base a los parámetros establecidos, con el fin de seleccionar la que cumple con las características fundamentales y necesarias para el proyecto.

A continuación, se irá analizando desde la tabla 30 hasta la tabla 32 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 30

Ponderación para evaluar los microprocesadores en base al costo

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	1,5	0,25
Alternativa 2	0,5		0,5	2	0,33
Alternativa 3	1	0,5		2,5	0,42
			Total	6	1

Tabla 31

Ponderación para evaluar los microprocesadores en base al tamaño

VELOCIDAD DE PROCESAMIENTO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	2,5	0,42
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0,5	0,5		2	0,33
			Total	6	1

Tabla 32

Ponderación para evaluar los microprocesadores en base a la velocidad de procesamiento

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,5
Alternativa 2	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa 3	0	0,5		1,5	0,25
			Total	6	1

Con los resultados obtenidos en la ponderación de los microcontroladores en base a cada uno de los parámetros, se realiza una tabla final donde se sumará los resultados obtenidos para seleccionar el dispositivo correcto para que sea parte del vehículo omnidireccional.

Tabla 33*Ponderación final y elección del microcontrolador.*

CRITERIO	Velocidad de procesamiento	Tamaño	Costo	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,25*0,4	0,42*0,3	0,5*0,3	0,376	1
Alternativa 2	0,33*0,4	0,25*0,3	0,25*0,3	0,282	3
Alternativa 3	0,42*0,4	0,33*0,3	0,25*0,3	0,342	2

b3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

En la tabla 33 se puede observar a la tarjeta ODROID, como la de mayor puntuación en porcentaje ya que cuenta con las características necesarias para la aplicación en el robot móvil, por su capacidad de almacenamiento, velocidad de procesamiento de la información y su fácil adquirir.

3.5.4. Subsistema 4: Vehículo omnidireccional

Este subsistema está compuesto por varios componentes, a continuación, se lista los dispositivos necesarios para el desarrollo del subsistema:

- Placa de fuente abierta
- Sensores de detección
- Motores
- Ruedas

a. LOCOMOCIÓN.

Antes de evaluar los componentes es necesario analizar el sistema de locomoción más idóneo para el vehículo omnidireccional a implementar, para esto se consideran 4 factores importantes para así obtener el de mejores características, presentados a continuación:

- Tamaño
- Movilidad
- Control
- Costo

Tabla 34

Ponderación de criterios de evaluación para el sistema de Locomoción

CRITERIO	Tamaño	Movilidad	Control	Costo	$\xi+1$	Ponderación
Tamaño		1	0	0	2	0,25
Movilidad	0		1	1	3	0,375
Control	0	0		1	2	0,25
Costo	0	0	0		1	0,125
Total					8	1

Como se puede observar en la tabla 34, el parámetro movilidad es el que está ponderado con mejor puntuación, debido a que el vehículo omnidireccional está expuesto a varios obstáculos al momento de desplazarse.

a1. Alternativas de sistemas de locomoción

Los vehículos omnidireccionales poseen grandes ventajas ya que cuenta con la capacidad de moverse en cualquier dirección es decir puede realizar desplazamientos frontales, laterales, de reversa y rotación partiendo de estar inmóvil.

Se eligió 2 opciones de similares características de vehículos de locomoción omnidireccionales para ser compararlos entre sí y seleccionar al más idóneo, estos son:

- **Alternativa 1: Vehículo omnidireccional de 3 ruedas:** este sistema de locomoción está compuesta de 3 motores con ruedas omnidireccionales separados entre sí 120 grados.

- **Alternativa 2: Vehículo omnidireccional de 4 ruedas:** este sistema de locomoción está compuesta de 4 motores con ruedas omnidireccionales separados entre sí 90 grados.

En las tablas 35 y 36 se presentan las ventajas y desventajas de los sistemas de locomoción propuestos mostrados a continuación:

Tabla 35

Ventajas y Desventajas del Vehículo omnidireccional de 3 ruedas

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Numero de Ruedas	Está compuesto por un sistema de 3 ruedas	No posee
Angulo de separación entre Motores	120 grados	No posee
Control	Cuenta con control y dirección simple	Posee estabilidad y tracción limitada
Cálculos de Diseño	El cálculo de este tipo de sistemas proporciona desplazamientos en cualquier dirección	Modelo matemático complejo
Precio	Precio moderado debido al costo de adquisición de motores y ruedas	Este tipo de sistemas tienden a incrementar su valor dependiendo del tipo de aplicación

Tabla 36

Ventajas y Desventajas del Vehículo omnidireccional de 4 ruedas

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Numero de Ruedas	Está compuesto por un sistema de 4 ruedas	No posee
Angulo de separación entre Motores	90 grados	No posee
Control	Cuenta con una mayor estabilidad y tracción	Posee mecánica y controles más complejos
Cálculos de Diseño	El cálculo de este tipo de sistemas proporciona desplazamientos en cualquier dirección	Modelo matemático complejo
Precio	Precio alto debido al costo de adquisición de motores y ruedas	Este tipo de sistemas tienden a incrementar su valor dependiendo del tipo de aplicación

a2. Ponderación y selección de las alternativas

Para la elección del sistema de locomoción se realizan las tablas de ponderación en base a los parámetros establecidos, con el fin de seleccionar el más idóneo para el desarrollo del proyecto.

A continuación, se irá analizando desde la tabla 37 hasta la tabla 40 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 37

Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al costo

TAMAÑO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,57
Alternativa 2	0,5		1,5	0,43
		Total	3,5	1

Tabla 38

Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al tamaño

MOVILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Total	3	1

Tabla 39

Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base al control

CONTROL	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,5
Alternativa 2	1		2	0,5
		Total	4	1

Tabla 40

Ponderación para evaluar del sistema de locomoción en base a la movilidad

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Total	3	1

Con los resultados obtenidos en la ponderación en base a cada uno de los parámetros establecidos, se realiza una tabla final donde se sumará los resultados obtenidos para seleccionar el sistema de locomoción, mostrados en la tabla 41.

Tabla 41
Ponderación final y elección del sistema de locomoción

CRITERIO	Tamaño	Movilidad	Control	Costo	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,57*0,4	0,67*0,3	0,5*0,15	0,67*0,15	0,605	1
Alternativa 2	0,43*0,4	0,33*0,3	0,5*0,15	0,33*0,15	0,395	2

a3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Una vez realizada la ponderación se define al vehículo omnidireccional de 3 ruedas como el sistema de locomoción porque posee las características necesarias para la movilización del prototipo a implementar.

b. Placa de código abierto

Esta placa de código abierto es utilizada para controlar el movimiento y dirección de los motores, además es la encargada de controlar el modo de operación del vehículo omnidireccional y a su vez controlar a los sensores que contiene el sistema.

Dentro de las características más idóneas a ponderar resaltan los siguientes parámetros establecidos, que son:

- Compatibilidad
- Cantidad de Entradas/salidas
- Costo

Tabla 42
Ponderación de parámetros de microcontroladores

CRITERIO	Compatibilidad	Cantidad E/S	Costo	$\xi+1$	Prioridad
Compatibilidad		0	0	1	0,16
Cantidad E/S	1		1	3	0,5
Costo	1	0		2	0,34
Total				6	100%

Se puede visualizar en la tabla 42 que el parámetro principal para la elección del microcontrolador es la cantidad de entradas y salidas que posee la tarjeta, esto se puede evidenciar debido a que en muchos proyectos es muy necesario contar con la cantidad necesaria de entradas y salidas puesto que se requerirá controlar varios sensores, motores y demás dispositivos afines vehículo omnidireccional.

b1. Alternativas de microcontroladores

Para la elección de dicha placa se comparó entre dos de similares características mostradas a continuación:

- **Alternativa 1: Arduino Mega:** Es una tarjeta open-source desarrollada con un microcontrolador modelo Atmega2560, la cual posee pines de entradas y salidas, las cuales son analógicas y digitales.
- **Alternativa 2: Basic Stamp2:** El Basic Stamp es usado en la educación tecnológica ya que proporciona facilidad de programar, además posee muchas aplicaciones en el control de procesos y la robótica.

En las tablas 43 y 44 se presentan las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas mostradas a continuación:

Tabla 43
Ventajas y desventajas de la placa Arduino Mega

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Microcontrolador	Incorpora el ATmega2560	Requiere seguir aumentando la capacidad
Número de entradas/salidas	Poseen un gran número de entradas y salidas, corresponden a 54	No posee
Peso	Peso ligero de 37 g	No posee
Dimensiones	Posee tamaño compacto de 101,52 x 53,3 mm	No posee
Sistema operativo	Soporta Windows, Mac OSX y Linux	No presenta
Memoria flash	Contiene 256 KB	Utiliza 8 KB para el gestor de arranque
Velocidad de reloj	Posee una velocidad de 16 MHz	No posee

Tabla 44
Ventajas y desventajas del Basic Stamp 2

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Microcontrolador	Posee PIC16C57, de la Familia de Microchip	Requiere seguir aumentando la capacidad
Número de entradas/salidas	Poseen un número de entradas y salidas limitadas, 16 + 2 serie dedicada	Limitada cantidad de Entradas/Salidas
Peso	Peso ligero	No posee
Dimensiones	Posee tamaño compacto de 30.0 x 16.0 x 3.81 mm	No posee
Sistema operativo	Soporta Windows	No presenta
Memoria flash	Contiene 2,048 KB	Posee limitaciones
Velocidad de reloj	Posee una velocidad de 20 MHz	No posee

b2. Ponderación y selección de las alternativas

Para la selección del microcontrolador a usarse en el vehículo omnidireccional, se procede a ponderar las dos alternativas seleccionadas en base a los parámetros establecidos para la elección.

A continuación, se irá analizando desde la tabla 45 hasta la tabla 47 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 45*Ponderación de microcontroladores en base a su costo*

COMPATIBILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
		Total	3	1

Tabla 46*Ponderación de microcontroladores en base a cantidad de entradas y salidas*

CANTIDAD E/S	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Total	3	1

Tabla 47*Ponderación de microcontroladores en base a compatibilidad*

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
		Total	7	1

Para poder seleccionar el microcontrolador más idóneo para el robot omnidireccional, se ponderó dos dispositivos de similares características y posteriormente como se muestra en la tabla 48 se realiza la ponderación final.

Tabla 48*Ponderación final de microcontroladores*

CRITERIO	Compatibilidad	Cantidad E/S	Costo	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,33*0,4	0,67*0,3	0,67*0,3	0,534	1
Alternativa 2	0,67*0,4	0,33*0,3	0,33*0,3	0,466	2

b3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Una vez realizada la ponderación se nota claramente que el microcontrolador Arduino mega posee ciertas características superiores, debido a su fácil manejo, basta documentación y gran cantidad de entradas y salidas.

c. Sensor

El sensor requerido para la plataforma omnidireccional posee la característica de detectar objetos, para este fin se requiere utilizar sensores ultrasónicos los cuales estarán ubicados en el vehículo de tal manera que le de autonomía durante el desplazamiento realizado.

Para encontrar el tipo de sensor que se adapten a lo requerido, se pone a consideración los siguientes parámetros que se deben tomar en cuenta:

- Alcance
- Ángulo de visión
- Costo

En la tabla 49 se establece el parámetro con mayor ponderación:

Tabla 49

Ponderación de los sensores en base a los parámetros establecidos

CRITERIO	Alcance	Ángulo de Visión	Costo	$\xi+1$	Prioridad
Alcance		0,5	1	2,5	0,42
Ángulo de Visión	0,5		1	2,5	0,42
Costo	0	0		1	0,16
			Total	6	1

De los tres parámetros se aprecia que el alcance de detección de objetos será sumamente importante a la hora de seleccionar el sensor.

c1. Alternativas de sensores

Para determinar el sensor ideal, se plantean dos alternativas con características similares los cuales deben cumplir el requerimiento de detección de objetos, estos son:

- **Alternativa 1: Sensor Ultrasónico HC-SR04:** Es un sensor que permite obtener distancias por ultrasonidos, logrando calcular la distancia a la que se encuentra un objeto, posee un rango de 2 a 450 cm.
- **Alternativa 2: Sensor Ultrasónico SRF08:** El sensor de alcance ultrasónico SRF08 identifica obstáculos en el rango de 3 a 600 cm.

En las tablas 50 y 51 se presentan las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas mostradas a continuación:

Tabla 50

Ventajas y Desventajas de usar un sensor Ultrasónico HC-SR04

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Interfaz	Posee Interfaz de cuatro pines VCC, TRIGGER, ECHO, GND.	No posee
Rango de medición	Gran rango de medición de 2 cm a 400cm.	Existe variantes con mayor rango
Resolución	La resolución es tan baja como de 3mm	La resolución puede ser afectada por condiciones ambientales
Precio	Muy económico, fácil adquisición	No posee
Peso	Peso ligero de 8,7 gr	No posee
Ángulo de medición efectivo	Amplio Angulo efectivo < 15°	Requiere de más sensores para incrementar el Angulo de medición
Dimensión	Tamaño pequeño 43 x 20 x 17 mm	No posee

Tabla 51

Ventajas y Desventajas de usar un sensor Ultrasónico SRF08

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Interfaz	Posee Interfaz de cuatro pines VCC, SDA, SCL, GND.	No posee
Rango de medición	Gran rango de medición de 3 cm a 600cm.	Existe variantes con rango similar

CONTINÚA



Resolución	La resolución es tan baja como de 3mm	La resolución puede ser afectada por condiciones ambientales
Precio	Precio medio-alto	No posee
Peso	Peso ligero de 9,1 gr	No posee
Ángulo de medición efectivo	Amplio Angulo efectivo < 15°	Requiere de más sensores para incrementar el Angulo de medición
Dimensión	Tamaño pequeño 43 x 20 x 17 mm	No posee

c2. Ponderación y selección de sensores

A continuación, se irá analizando desde la tabla 52 hasta la tabla 54 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 52

Ponderación de sensores en base a su Alcance

ALCANCE	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,5
Alternativa 2	1		2	0,5
Total			4	1

Tabla 53

Ponderación de sensores en base al Ángulo de visión

ÁNGULO DE VISIÓN	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,5
Alternativa 2	1		2	0,5
Total			4	1

Tabla 54

Ponderación de sensores en base al Costo

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	2	0,67
Alternativa 2	0		1	0,33
Total			3	1

Para establecer el sensor apto para la plataforma omnidireccional, a continuación, se realiza el resumen de la ponderación final en base a los parámetros establecidos, mostrados en la tabla 55:

Tabla 55*Ponderación final de los sensores en base a los parámetros establecidos*

CRITERIO	Alcance	Ángulo de Visión	Costo	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,5*0,4	0,5*0,3	0,67*0,3	0,551	1
Alternativa 2	0,5*0,4	0,5*0,3	0,33*0,3	0,449	2

c3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Aunque no existe mayor variación entre los dos sensores, los números se inclinan hacia el sensor ultrasónico HC-SR04 porque posee un amplio rango para la detección de objetos, porcentaje de error bajo y el precio de adquisición es muy reducido.

d. MOTOR

Para dar movimiento a la plataforma omnidireccional la selección de los motores que harán que las ruedas se desplacen cuando sea necesario es fundamental, estos motores deben contar con características físicas y técnicas necesarios para dar movimiento al robot.

Para buscar al motor encargado de dar movimiento al vehículo omnidireccional, se tiene que tener en cuenta algunos parámetros para establecer el indicado, estos son:

- Potencia
- Rpm
- Consumo de energía

Estos parámetros se ponderan para conocer el requerimiento más influyente para seleccionar el motor, mostrados en la tabla 56.

Tabla 56*Ponderación de los parámetros del motor*

CRITERIO	Potencia	Rpm	Consumo de energía	$\xi+1$	Ponderación
Potencia		1	0,5	2,5	0,42
Rpm	0		0,5	1,5	0,25
Consumo de energía	0,5	0,5		2	0,33
Total				6	1

d1. Alternativas de tipos de motores

En el mercado existe un sinnúmero de motores que pueden utilizarse, de diferente tamaño y tipo, para ello se va a seleccionar los siguientes tipos de motores, estos son:

- **Alternativa 1: Motor paso a paso:** Es un dispositivo electromecánico capaz de convertir una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares dependiendo de sus entradas de control.
- **Alternativa 2: Motor de corriente continua (DC):** Este tipo de dispositivos permite regular continuamente la velocidad del motor, Además permiten cambiar el sentido de rotación invirtiendo la polaridad.

En las tablas 57 y 58 se presentan las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas mostradas a continuación:

Tabla 57*Ventajas y Desventajas de los motores paso a paso*

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Precisión	Utilizado en aplicaciones donde la precisión de los desplazamientos tiene gran importancia	Falta de precisión en el arranque y parada del motor
Control de Velocidad	Amplio rango de velocidades de rotación, ya que responde a la frecuencia de pulsos de entrada digitales	Error de paso inferior al 5%.
Capacidad de Carga	Posee capacidad de carga aceptable para ciertas aplicaciones CNC	Bajo torque
Tamaño	Tamaño compacto y peso ligero	No posee

Tabla 58
Ventajas y Desventajas de un motor de corriente continúa

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Precisión	Es capaz de otorgar posicionamiento simple y exacto	Dificultad a velocidades bajas
Control de Velocidad	Sistema de bajo costo para control de velocidad y torque	Requiere de mantenimiento
Capacidad de Carga	Tiene la capacidad de soportar cargas que requieran una gran cantidad de energía para moverse	Incrementa su tamaño para poseer mayor capacidad de carga
Tamaño	Posee una alta relación potencia-peso, reduciendo los costes de instalación y proporciona un ahorro de espacio	No posee

d2. Ponderación y selección de los motores

A continuación, se irá analizando desde la tabla 59 hasta la tabla 62 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 59
Ponderación de motores en base a su potencia

POTENCIA	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
		Total	3	1

Tabla 60
Ponderación de motores en base a los RPM

RPM	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	0,33
Alternativa 2	1		2	0,67
		Total	3	1

Tabla 61
Ponderación de motores en base al consumo de energía

CONSUMO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1,5	0,5
Alternativa 2	0,5		1,5	0,5
		Total	3	1

Tabla 62*Ponderación final de los motores en base a los parámetros establecidos*

CRITERIO	Potencia	Rpm	Consumo de energía	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,33*0,4	0,33*0,3	0,5*0,3	0,381	2
Alternativa 2	0,67*0,4	0,67*0,3	0,5*0,3	0,619	1

d3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Al ponderar cada uno de los motores en base a los criterios de evaluación y sus características, se nota la superioridad de un motor de corriente continua, el cual cumple con las expectativas necesarias para la plataforma omnidireccional.

e. RUEDA

Para la selección de las ruedas que poseerá vehículo omnidireccional se tiene tres factores a tomar en cuenta, estos son:

- Tamaño
- Tracción
- Costo

Estos parámetros se ponderan para conocer el requerimiento más influyente en la selección de las ruedas, mostrados en la tabla 63.

Tabla 63*Ponderación de las ruedas en base a los parámetros establecidos*

CRITERIO	Costo	Tracción	Tamaño	$\xi+1$	Prioridad
Tamaño		0	0	1	0,2
Tracción	0,5		0,5	2	0,4
Costo	0,5	0,5		2	0,4
Total				5	1

e1. Alternativas de ruedas

Una vez realizada la ponderación de las ruedas en función a los parámetros establecidos, se aprecia que influye mucho la tracción y el costo para la elección de las mismas, a continuación, se muestran las siguientes alternativas:

- **Alternativa 1: Rueda omnidireccional:** Presenta la apariencia de una rueda estándar dotada de una corona de rodillos, posee ejes de giro perpendiculares a la dirección normal de avance.
- **Alternativa 2: Rueda Mecanum:** Es una rueda central, la cual posee cierto número de rodillos colocados en un ángulo alrededor de la periferia de la rueda.

En las tablas 64 y 65 se presentan las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas mostradas a continuación:

Tabla 64
Ventajas y Desventajas de la Rueda omnidireccional

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Aplicación	Se utilizan ruedas omnidireccionales en sistemas de configuración de tres ruedas	Posee limitaciones en aplicaciones con gran número de ruedas
Angulo de rodillos respecto a la rueda	Los rodillos forman un ángulo de 90° respecto al eje de giro de la rueda.	No posee
Desplazamiento	Posee mayor libertad de movimiento en comparación con los robots que usan ruedas convencionales	Complejos cálculos matemáticos
Precio	El precio es superior al de las llantas comunes por el amplio rango de movimiento que posee	Por su precio elevado se utiliza en aplicaciones específicas
Adquisición	Fácil adquisición Online	Requiere importación

Tabla 65
Ventajas y Desventajas de la Rueda Mecanum

Parámetros de Evaluación	Ventajas	Desventajas
Aplicación	Se utilizan ruedas mecanum en configuraciones de 4, 6 y 8 ruedas	No posee
Angulo de rodillos respecto a la rueda	Los rodillos forman un ángulo de 45° respecto al eje de giro de la rueda	No posee
Desplazamiento	Posee mayor libertad de movimiento en comparación con los robots que usan ruedas convencionales	Complejos cálculos matemáticos
Precio	El precio es acorde a la de las ruedas omnidireccionales	El precio es alto debido a la cantidad de ruedas a utilizar en un sistema
Adquisición	Fácil adquisición Online	Requiere importación

e2. Ponderación y selección de las ruedas omnidireccionales

A continuación, se irá analizando desde la tabla 66 hasta la tabla 69 las ponderaciones respecto los parámetros establecidos.

Tabla 66
Ponderación de las ruedas en base al costo

TAMAÑO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,5
Alternativa 2	1		2	0,5
		Total	4	1

Tabla 67
Ponderación de las ruedas en base a la tracción

TRACCIÓN	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		0,5	1,5	0,5
Alternativa 2	0,5		1,5	0,5
		Total	3	100%

Tabla 68
Ponderación de las ruedas en base a la velocidad

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	$\xi+1$	Prioridad
Alternativa 1		1	2	0,57
Alternativa 2	0,5		1,5	0,43
		Total	3,5	1

Tabla 69*Ponderación final de la selección de las ruedas*

CRITERIO	Tamaño	Tracción	Costo	ξ total	Prioridad
Alternativa 1	0,5*0.4	0,5*0.3	0,57*0.3	0,521	1
Alternativa 2	0,5*0.4	0,5*0.3	0,43*0.3	0,479	2

e3. Conclusión de la Evaluación y Selección realizada

Al realizar la ponderación de cada una de las alternativas propuestas se puede apreciar que la opción ganadora es la alternativa 1 que se adapta perfectamente al sistema de locomoción seleccionado anteriormente.

3.5.6. Subsistema 5: Acceso remoto PC

El sistema de acceso remoto consiste en acceder a la tarjeta microcontroladora mediante comunicación wifi y así visualizar el mapeo realizado por parte del vehículo omnidireccional desde un computador.

Para este fin se utiliza el módulo wifi proporcionado y distribuido oficialmente para la tarjeta Odroid-XU4, este módulo wifi posee la compatibilidad exclusiva y necesaria para los módulos Odroid, razón por la cual no se realiza tablas de selección puesto se requiere utilizar accesorios propios del microcontrolador.

3.6. Descripción del diseño

A continuación, se presenta la tabla resumen con los elementos seleccionados de cada subsistema y su descripción, estos son:

Tabla 70*Tabla resumen de los elementos de la Plataforma móvil omnidireccional*

Subsistema	Elemento	Descripción
Estructura	Base	Base de forma hexagonal
Energía	Batería	Batería seca
Mapeo y Localización	Sensor	Sensor Kinect XBOX 360
	Microprocesador	El Odriux-XU4
	Placa de fuente abierta	Arduino Mega
Vehículo Omnidireccional	Sensores	Sensores ultrasónicos
	Motores	Motores de corriente continua.
	Ruedas	Sistema de tres ruedas omnidireccionales
Acceso Remoto PC	Ordenador	Sensor Kinect

3.6.1. Subsistema 1. Estructura

La estructura necesita de un material resistente y a su vez liviano para que no influya en gran proporción al peso total del vehículo omnidireccional, para ello se ha seleccionado como material al acrílico transparente para la base superior e inferior y las caras laterales, debido a que este material cuenta con propiedades físicas y mecánicas necesarias para soportar los elementos del robot.

Se propone que el robot esté compuesto por 2 pisos, donde los elementos vayan distribuidos como se muestra en la tabla 71:

Tabla 71*Elementos que conforman la plataforma por cada piso*

Piso	Elementos	Cantidad
Piso 1	Motor	3
	Batería	1
	Sensor Ultrasónico	6
	Odrioux-XU4	1

CONTINÚA



	Controlador Arduino Mega	1
	Controladores LM	2
	Llanta omnidireccional	3
	Acople ultrasonidos	3
	Acople de Motor	3
Piso 2	Sensor Kinect	1
	Acople Kinect	1

En la figura 23 se muestran los elementos que conforman la plataforma por cada piso, además se puede apreciar la posición y ubicación de cada uno, logrando visualizar de forma general el ensamblado que posee el dispositivo omnidireccional



Figura 23. Elementos que conforman la plataforma por cada piso

a. Diseño mecánico

El diseño parte de una base hexagonal en la cual se ubican los soportes para distribuir las llantas, además esta base contendrá los elementos electrónicos, por lo que se debe considerar el peso de cada uno de los elementos para conocer y analizar los esfuerzos que soporta la estructura.

En la figura 24 se presenta el diseño de la base de la plataforma móvil omnidireccional.

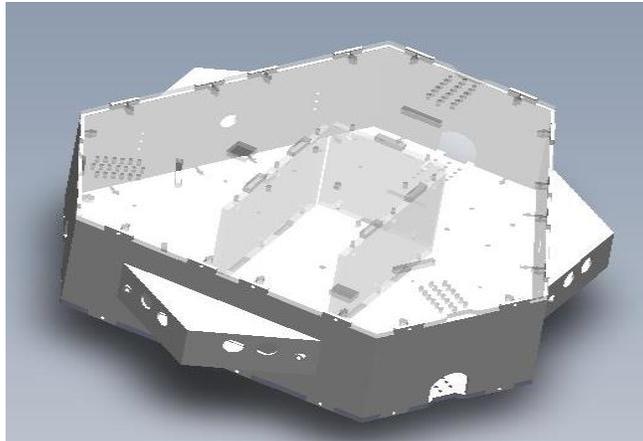


Figura 24. Estructura de la Plataforma móvil omnidireccional

a1. Análisis de Esfuerzos de la estructura del Robot Móvil

Para conocer si los materiales a utilizar resisten las fuerzas que actúan sobre ellos durante el proceso de las tareas para lo cual fueron contruidos, se debe calcular la resistencia del material, y con ese análisis saber que material es ideal para garantizar una buena vida útil al prototipo

Para efectuar los cálculos se debe realizar el diseño de la parte física del prototipo, debido que se debe tener claro todas las áreas de cada una de las piezas que estarán contenidas dentro del cuerpo del robot a emplear. Para este prototipo, las áreas que se requieren conocer son: la base superior donde se encuentra el Kinect, base inferior la cual contendrá toda la estructura, las caras laterales y los acoples contenidos en la plataforma omnidireccional, como se observa en la figura 25.

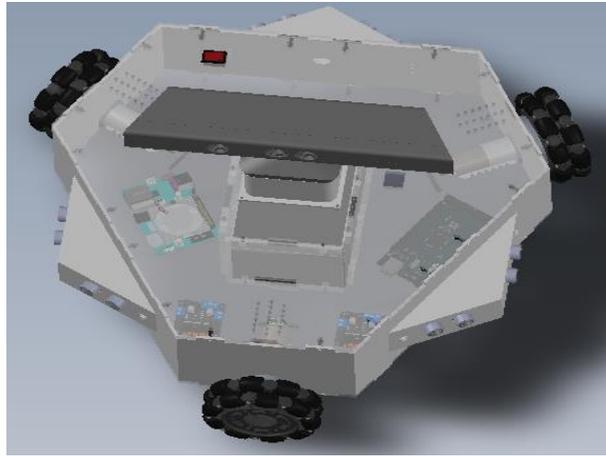


Figura 25. Estructura del vehículo omnidireccional.

Es necesario calcular el esfuerzo que soportar cada pieza que compone la estructura, esto se logra mediante la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el vehículo omnidireccional, en otras palabras, hay que considerar el peso de cada uno los elementos como sensores, motores, el peso de las piezas de la estructura, batería, etc.

Mediante la siguiente fórmula se obtiene el esfuerzo de cualquier material:

$$\sigma = \frac{F_t}{A}$$

Donde σ es el esfuerzo del material, F_t es la fuerza total en Newton, A es el área en metros cuadrados, las unidades están dadas en pascales, es decir N/m². Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios se realizarán los cálculos del esfuerzo del material para acrílicos de diferentes espesores con el fin de determinar el más idóneo para la estructura.

A continuación, se muestra el desarrollo de los cálculos realizados para el diseño propuesto del vehículo omnidireccional, en el cual se contempló como material el acrílico para su construcción.

Para hallar el área de un hexágono irregular, es necesario dividir la figura en triángulos y hallar el lado y altura de cada uno de estos.

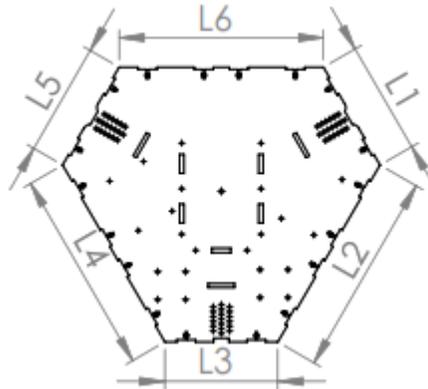


Figura 26. Lados del hexágono

$$A = \frac{L1 * h1}{2} + \frac{L2 * h2}{2} + \frac{L3 * h3}{2} + \frac{L4 * h4}{2} + \frac{L5 * h5}{2} + \frac{L6 * h6}{2}$$

$$A = \frac{0.15m * 0.2m}{2} + \frac{0.2714m * 0.165m}{2} + \frac{0.15m * 0.2m}{2} + \frac{0.2714m * 0.165m}{2} + \frac{0.15m * 0.2m}{2} + \frac{0.2714m * 0.165m}{2}$$

$$A = 0.1121m^2$$

- Peso de la base superior (W1) e inferior (W2) hexagonal en acrílico (con espesor de 6mm).

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del acrílico}$$

$$\text{Masa} = 0,1121m^2 * 0.006m * 1190 \frac{\text{Kg}}{m^3}$$

$$\text{Masa} = 0.8\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.8\text{Kg} * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{Peso}(W1) = \text{Peso}(W2) = 7.8438\text{N}$$

- **Áreas caras laterales 1,3 y 5**

El área de las caras laterales 1, 3 y 5 corresponde a un rectángulo y poseen las mismas dimensiones, razón por la cual se calcula el área de una de las caras y el de las dos restantes corresponderá a la misma área.

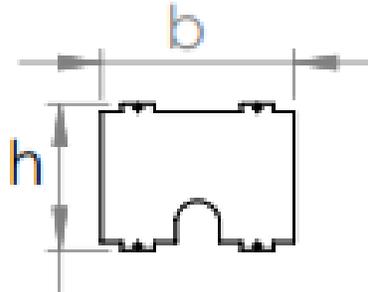


Figura 27. Cara lateral 1, 3 y 5

$$b = 0.15\text{m}, h = 0.102\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.15\text{m} * 0.102\text{m}$$

$$A1 = A3 = A5 = 0.0153\text{m}^2$$

- **Pesos de las caras laterales 1, 3 y 5 en acrílico (con espesor de 3mm)**

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del acrílico}$$

$$\text{Masa} = 0,0153\text{m}^2 * 0.003\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa1} = \text{Masa3} = \text{Masa5} = 0.0546\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.0546\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso1}(W) = \text{Peso3}(W) = \text{Peso5}(W) = 0.535\text{N}$$

- **Áreas caras laterales 2, 4 y 6**

El área de las caras laterales 2, 4 y 6 corresponde a un rectángulo y poseen las mismas dimensiones, razón por la cual se calcula el área de una de las caras y el de las dos restantes corresponderá a la misma área.

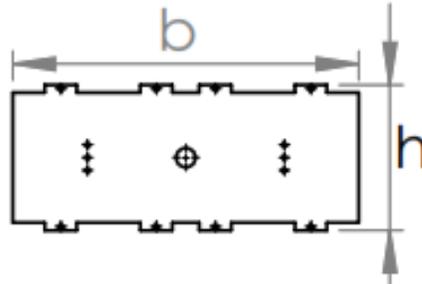


Figura 28. Cara lateral 2, 4 y 6

$$b = 0.2714\text{m}, h = 0.102\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.2714\text{m} * 0.102\text{m}$$

$$A_2 = A_4 = A_6 = 0.02768\text{m}^2$$

- **Pesos de las caras laterales 1, 3 y 5 en acrílico (con espesor de 3mm)**

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del acrílico}$$

$$\text{Masa} = 0,0217\text{m}^2 * 0.003\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa}_2 = \text{Masa}_4 = \text{Masa}_6 = 0.0774\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.0774\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso}_2(W) = \text{Peso}_4(W) = \text{Peso}_6(W) = 0.7591\text{N}$$

- **Área del acople para sensores ultrasónicos**

El área de las caras corresponde a 2 triángulos y 2 rectángulos calculados a continuación:

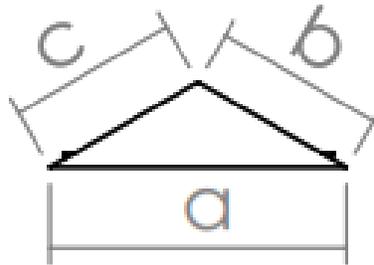


Figura 29. Lados del triángulo para el acople del sensor ultrasónico

$$a = 0.1787\text{m}, b = 0.1032\text{m}, c = 0.1032\text{m}$$

$$p = \frac{a + b + c}{2}$$

$$p = 0.19255\text{m}$$

$$A1 = \sqrt{p(p - a) \cdot (p - b) \cdot (p - c)}$$

$$A1 = 0,004614\text{m}^2$$

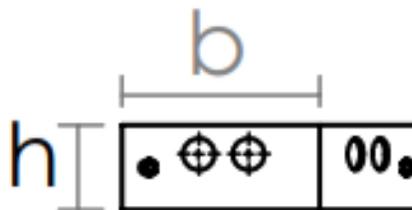


Figura 30. Rectángulo del acople del sensor ultrasónico

$$b = 0.1032\text{m}, h = 0.04\text{m}$$

$$A = 0.1032\text{m} * 0.04\text{m}$$

$$A2 = 0.004128\text{m}^2$$

- Pesos de las caras correspondientes a A1 (con espesor de 3mm)

$$\text{Masa} = A1 * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A1 * \text{Espesor} * \text{Densidad del PETG}$$

$$\text{Masa} = 0,004614\text{m}^2 * 0.003\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa1} = \text{Masa2} = 0.01647\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.01647\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso1}(W) = \text{Peso2}(W) = 0.1614\text{N}$$

- Pesos de las caras correspondientes a A2 (con espesor de 1,62 mm)

$$\text{Masa} = A2 * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A2 * \text{Espesor} * \text{Densidad del PETG}$$

$$\text{Masa} = 0.004128\text{m}^2 * 0.00162\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa3} = \text{Masa4} = 0.00796\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.00796\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso3}(W) = \text{Peso4}(W) = 0.078\text{N}$$

- $\text{Peso Total}(W) = \text{Peso1}(W) + \text{Peso2}(W) + \text{Peso3}(W) + \text{Peso4}(W)$

$$\text{Peso Total}(W) = 0.4788\text{N}$$

- **Área del acople para el sensor Kinect**

El área de las caras laterales del acople corresponde a varios rectángulos y poseen las distintas dimensiones, razón por la cual se calcula el área de cada una de las caras.

- Areal:

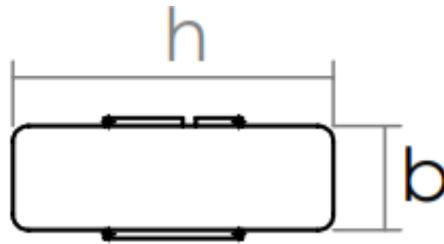


Figura 31. Cara 1 del acople para el sensor Kinect

$b = 0.065\text{m}$, $h = 0.2\text{m}$

$$A = b * h$$

$$A = 0.065\text{m} * 0.2\text{m}$$

$$A1 = 0.013\text{m}^2$$

- Peso de la cara lateral 1 (con espesor de 1cm)

Masa = A * Espesor * Densidad del material

Masa = A * Espesor * Densidad del PETG

$$\text{Masa} = 0,013\text{m}^2 * 0.01\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa1} = 0.1547\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.1547\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso1}(W) = 1.516\text{N}$$

- Área 2 y 3:

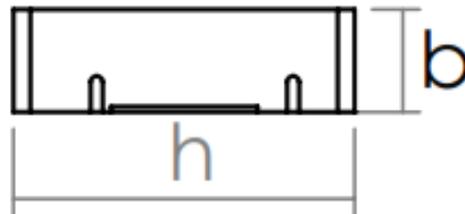


Figura 32. Caras 2 y 3 del acople para el sensor Kinect

$$b = 0.06\text{m}, h = 0.2\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.060\text{m} * 0.2\text{m}$$

$$A_2 = A_3 = 0.012\text{m}^2$$

- Pesos de las caras laterales 2 y 3 en acrílico (con espesor de 0.5cm)

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del PETG}$$

$$\text{Masa} = 0,012\text{m}^2 * 0.005\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa}_2 = \text{Masa}_3 = 0.0714\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.0714\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso}_2(W) = \text{Peso}_3(W) = 0.699\text{N}$$

- Área 4 y 5:

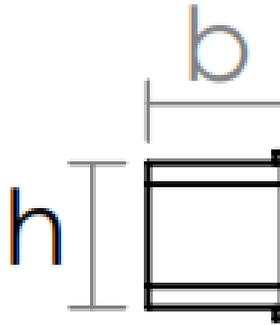


Figura 33. Caras 4 y 5 del acople para el sensor Kinect

$$b = 0.06\text{m}, h = 0.065\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.06\text{m} * 0.065\text{m}$$

$$A_4 = A_5 = 0.0039\text{m}^2$$

- Pesos de las caras laterales 4 y 5 en acrílico (con espesor de 0.5cm)

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del PETG}$$

$$\text{Masa} = 0,0039\text{m}^2 * 0.005\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa4} = \text{Masa5} = 0.0232\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.0232\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso4}(W) = \text{Peso5}(W) = 0.227\text{N}$$

- $\text{Peso Total}(W) = \text{Peso1}(W) + \text{Peso2}(W) + \text{Peso3}(W) + \text{Peso4}(W) + \text{Peso5}(W)$

$$\text{Peso Total}(W) = 3.368\text{N}$$

- **Área del acople para la batería**

El área de las caras laterales del acople para la batería corresponde a un rectángulo y poseen las mismas dimensiones, razón por la cual se calcula el área de una de las caras y el de las dos restantes corresponderá a la misma área.

- Área 1 y 2:

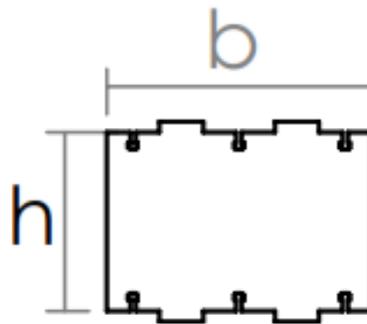


Figura 34. Caras 1 y 2 del acople de la batería

$$b = 0.151\text{m}, h = 0.102\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.151\text{m} * 0.102\text{m}$$

$$A1 = A2 = 0.0154\text{m}^2$$

- Pesos de las caras laterales 2 y 3 en acrílico (con espesor de 3mm)

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del acrilico}$$

$$\text{Masa} = 0,0154\text{m}^2 * 0.003\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa2} = \text{Masa3} = 0.0549\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.0549\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso1}(W) = \text{Peso2}(W) = 0.5388\text{N}$$

- Área 3:

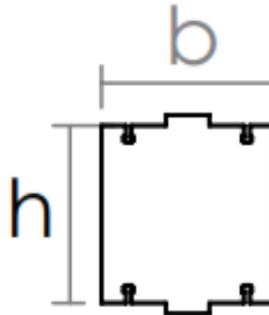


Figura 35. Caras 3 y 4 del acople de la batería

$$b = 0.065\text{m}, h = 0.102\text{m}$$

$$A = b * h$$

$$A = 0.065\text{m} * 0.102\text{m}$$

$$A3 = A4 = 0.00663\text{m}^2$$

- Pesos de las caras laterales 3 y 4 en acrílico (con espesor de 3mm)

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del material}$$

$$\text{Masa} = A * \text{Espesor} * \text{Densidad del acrilico}$$

$$\text{Masa} = 0,00663\text{m}^2 * 0.003\text{m} * 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Masa4} = \text{Masa5} = 0.02366\text{Kg}$$

$$\text{Peso}(W) = 0.02366\text{Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso3}(W) = 0.2319\text{N}$$

- $\text{Peso Total}(W) = \text{Peso1}(W) + \text{Peso2}(W) + \text{Peso3}(W)$

$$\text{Peso Total}(W) = 1.3095\text{N}$$

Tras haber hallado el peso de las partes que conforman la estructura del prototipo, en la tabla 72 a continuación se encuentra relacionada la masa y el peso de las piezas y dispositivos que hacen parte del vehículo omnidireccional.

Tabla 72

Cálculo de masa de los elementos del vehículo omnidireccional

Elemento	Cantidad	Masa (Kg)	Peso (N)
Odroid-xu4	1	0.0862 Kg	0.8447 N
Kinect Xbox	1	0.450kg	4.41 N
Módulo wifi odroid	1	0.012 kg	0.1176 N
Módulo L298N	2	0.06 Kg	0.588 N
Sensor ultrasónico hc-sr04	6	0.0522 Kg	0.512N
Arduino mega	1	0.037 Kg	0.3626 N
Batería	1	2.3 Kg	22.54 N
Motor	3	0.312 Kg	3.0576
Acoplamiento eje de motor	3	0.3 Kg	2.94 N
Llantas	3	0.87 Kg	8.526 N

CONTINÚA



Módulo nrf24L0	1	0.010 Kg	0.098 N
Base hexagonal en acrílico	2	1.6007 Kg	15.6876 N
Base cara lateral 1,3 y 5 en acrílico	3	0.1637 Kg	1.6050 N
Base cara lateral 2,4 y 6 en acrílico	3	0.2323 Kg	2.2770 N
Acople Kinect	1	0.3436 Kg	3.368N
Acople Ultrasonidos	3	0.0488 Kg	0.4788N
Acople Batería	1	0.1336 Kg	1.3095N
Total		7.0121 Kg	68.7224N

Con el propósito de establecer el esfuerzo de base hexagonal inferior en acrílico se calculará el esfuerzo generado.

$$\sigma = \frac{F_t}{A}$$

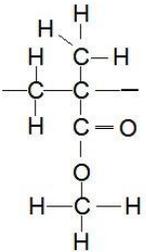
$$\sigma = \frac{68.7224 \text{ N}}{0.1121 \text{ m}^2}$$

$$\sigma = 613.045 \text{ Pa}$$

$$\sigma = 0.613045 \text{ MPa}$$

El esfuerzo mínimo que requerirá soportar la base inferior de la plataforma corresponde a $\sigma = 0.613045 \text{ MPa}$, para establecer la mejor opción de acrílico según su espesor es necesario revisar las especificaciones técnicas del acrílico transparente con los diferentes espesores y el seleccionado será el que cumpla con el esfuerzo mínimo calculado, dentro de los materiales más utilizados para este tipo de aplicaciones está el Polimetil-metacrilato (PMMA), el cual ofrece resistencias de 42 – 82 MPa.

Tabla 73
Propiedades del PMMA

Polímero	Estructura	Carga rotura (MPa)	Alarg. (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (Mg/m ³)	Temp. def. por calor a 455 kPa	Aplicaciones
Polimetilmetacrilato (PMMA)		41-82	2-5	2.4-3.1	1.22	93	Acrilamiento de vehículos, lentes de contacto, iluminación exterior, señales publicitarias, pantallas de seguridad, gafas protectoras.

Una vez establecido el material que cumpla con los cálculos realizados, se selecciona el espesor del mismo, para esto los fabricantes proporcionan la tabla comparativa del espesor de la placa con respecto al peso soportado.

Tabla 74
Peso por metro cuadrado

Espesor (mm)	Peso (Kg.)						
2.4	2,860	6	7,140	15	17,850	25	29,750
3.2	3,808	8	9,520	18	21,420	30	35,700
4	4,760	10	11,900	20	23,800	35	41,650
5	5,950	12	14,280	22	26,180	40	47,600

La plataforma cuenta con un peso aproximado de 7.0121 Kg motivo por el cual se seleccionará el espesor de 6mm el cual ofrece 7.140 Kg, logrando así satisfacer todos los requerimientos.

a2. Acople de tracción

Para implementar la tracción del motor se tendrán tres llantas acopladas al contorno de la plataforma móvil omnidireccional, en las figuras de la 36 a la 40 se muestran el acople de tracción que posee la plataforma móvil omnidireccional.

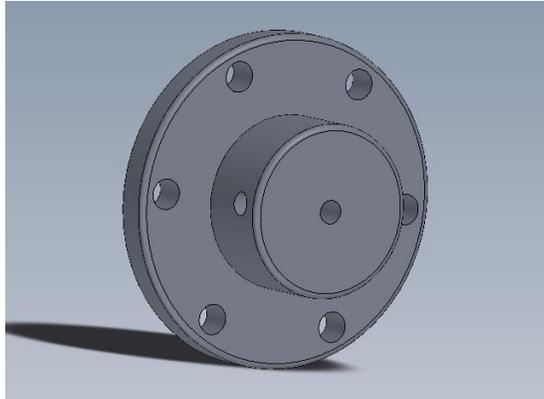


Figura 36. Acople llanta-motor

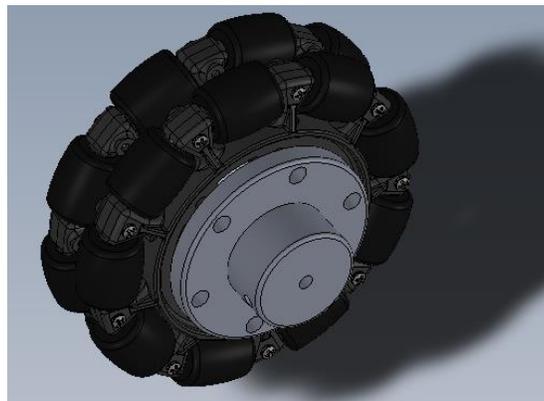


Figura 37. Sujeción acople-llanta

Una vez que las ruedas han sido acopladas, estas pueden ser sujetadas al motor, sin embargo, es necesario utilizar un componente adicional, el cual permite sujetar el motor a la base de la plataforma móvil omnidireccional. Este acople se fijará a la hexagonal inferior de acrílico y colocará al motor en la posición exacta a la vez que conectará la ranura a la salida de la caja reductora con el lado de menor dimensión, con la finalidad de lograr mayor precisión y estabilidad en el movimiento.

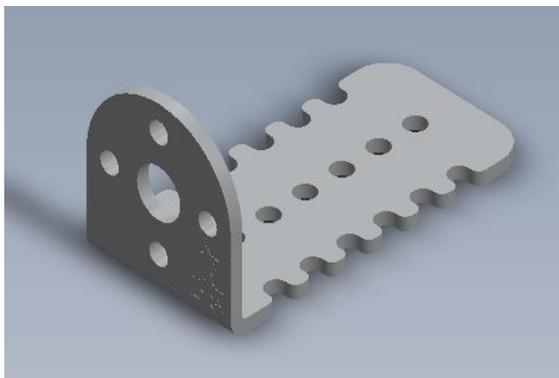


Figura 38. Sujetador motor-estructura

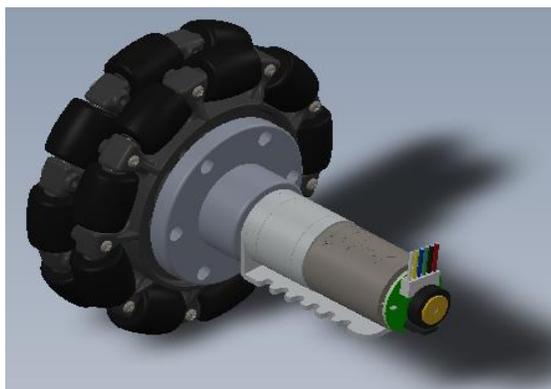


Figura 39. Unión de elementos

Finalmente, en la figura 40 se puede observar la sujeción del sistema de tracción con la base inferior de la plataforma omnidireccional.

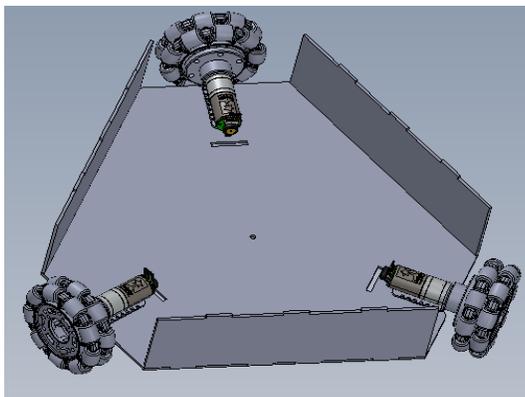


Figura 40. Sujeción de elementos a la plataforma

a3. Soporte de Sensores Ultrasónicos

Para proporcionarle autonomía a la plataforma móvil omnidireccional y mediante la selección de materiales se establece a los sensores ultrasónicos como los más idóneos para la detección de obstáculos. Como se muestra en las figuras de la 41 a la 43, se diseñan los soportes de tal manera que puedan ser colocados en el contorno de la plataforma móvil omnidireccional. Los cilindros de los transductores encajan perfectamente en los orificios de los acoples, su diseño colabora con un óptimo rango de operación y ayuda a garantizar el correcto envío y recepción de señales, por ende, información valiosa para la ubicación del robot en el entorno.

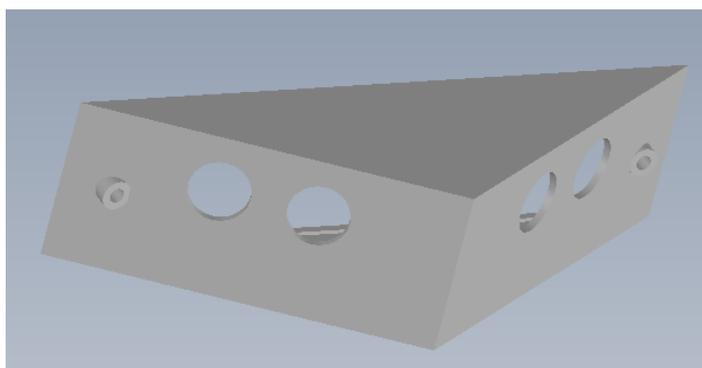


Figura 41. Estructura para adaptar sensores ultrasónicos

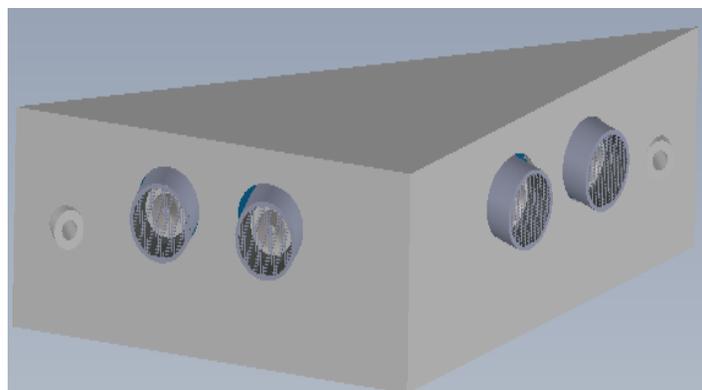


Figura 42. Sensores ultrasónicos acoplados

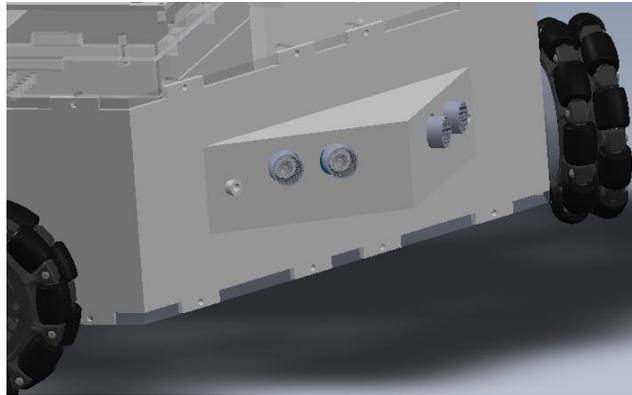


Figura 43. Sensores ultrasónicos acoplados a la estructura

a4. Acople sensor Kinect

La plataforma móvil omnidireccional es capaz de realizar mapeos del entorno por donde se desplaza, para esto utiliza el sensor Kinect, con el fin de acoplarlo a la estructura se fabrica un elemento capaz de estabilizar y mantener fijo al sensor como se muestra en las figuras 44 y 45. Este acople brinda firmeza respecto a las imágenes captadas por el dispositivo con lo que el mapeo garantiza fiabilidad. Además, permite organizar material como cables y acoples creando un diseño visualmente satisfactorio.

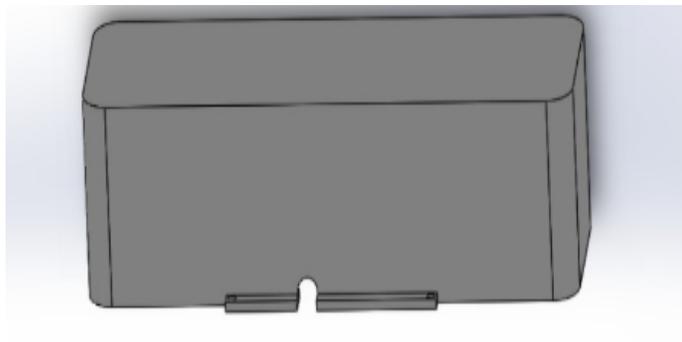


Figura 44. Acople sensor kinect

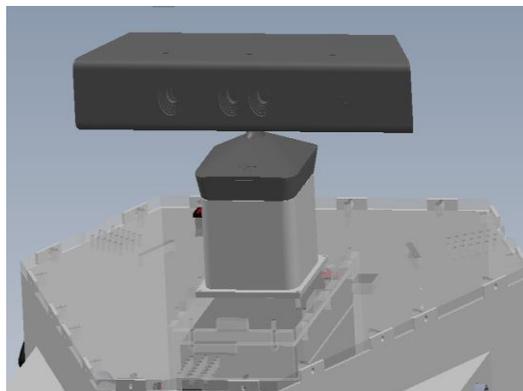


Figura 45. Sensor Kinect acoplado a la estructura

3.6.2 Energía

Para el diseño de la fuente de energía es necesario conocer los parámetros de consumo tanto de corriente como voltaje de cada uno de los elementos que conforman la plataforma móvil omnidireccional, esta información se obtiene de las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, en la tabla 75 se detalla el consumo de los elementos.

Aumentar una columna que se Potencias, con la misma que se debe realizar los cálculos debido que la potencia si se puede sumar y no la corriente como se lo está realizando.

Tabla 75

Consumo de energía de los Elementos que conforman la plataforma

Elemento	Voltaje V	Corriente mA	Potencia w
Kinect XBOX 360	12 V	1080 mA	12.96 W
Odriux-XU4	5 V	5000 mA	25 W
Arduino Mega	7 – 12 V	200 mA	2.4 W
Módulo L298N	5 – 12 V	300 mA	3.6 W
Sensor ultrasónico hc-sr04	5 V	45 mA	0.225 W
Motor Pololu	12V	4200 mA	50.4 W
Módulo NRF24L01	3.3 V	12.3 mA	0.04059 W
TOTAL	12 V		94.625559 W

Al sumar todos los elementos de consumo se obtiene los valores de la fuente que alimentará al sistema del vehículo omnidireccional, la cual deberá poseer 12 Voltios y una potencia de 94.626 W, al despejar de la fórmula $P = V * I$, en donde P es la potencia, V el voltaje y I la corriente se obtiene que la corriente mínima necesaria para alimentar la plataforma móvil es de 7,8855 A.

Cabe mencionar que el sistema a alimentar se comporta como un circuito en paralelo en donde el voltaje es el mismo, es decir que la fuente de alimentación en cada uno de los dispositivos y la corriente entregada por la fuente de alimentación se divide para cada dispositivo.

Los diferentes elementos funcionan a diferentes voltajes de operación, razón por la cual se hará uso de dispositivos reguladores de voltaje los cuales reciben el voltaje de la fuente de energía y entregan el voltaje requerido por el dispositivo, permitiendo así poseer una fuente de alimentación con diferentes voltajes.

Para establecer el tiempo de duración de la batería se toma en cuenta las siguientes especificaciones.

- Carga de la batería = $12V \times 11A = 132W$
- Consumo/hora = $12V * 7,8855 A = 94.6256W$
- Duración de la batería = $\frac{132W}{94.6256W} = 1 \text{ Hora, } 39 \text{ Minuto}$ aproximadamente

despreciando fugas.

3.6.3. Subsistema 3: Mapeo y Localización

En este subsistema tenemos a dos elementos que fueron seleccionados en base a la ponderación de sus características y a las ventajas que poseen frente a otros de similar funcionamiento, estos son:

- Sensor Kinect XBOX 360
- Odriux XU4

La figura 46 muestra el subsistema de localización y mapeo.

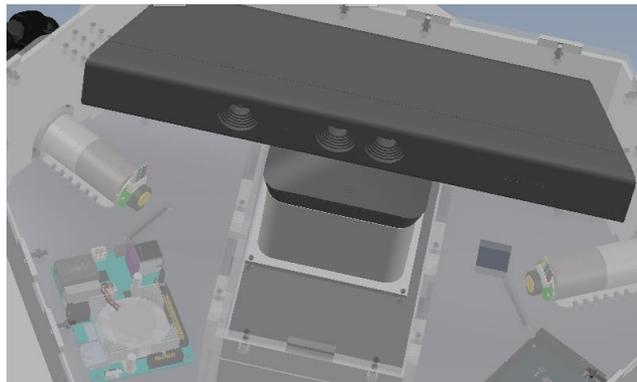


Figura 46. Subsistema mapeo y localización

A continuación, se presentan las características físicas y técnicas de estos elementos:

- **Sensor Kinect XBOX 360**

En la tabla 76 se muestran las especificaciones técnicas del Sensor Kinect XBOX 360, detalladas a continuación:

Tabla 76*Especificaciones técnicas del Sensor Kinect*

Sensor Kinect XBOX 360	
Cámara de movimiento	Cámara VGA a color con resolución de 640x480 pixeles
Cámara de profundidad	640 x 480 pixeles
Número de micrófonos	Matriz de 4 micrófonos
Ángulo de visión horizontal	57°
Ángulo de visión vertical	43°
Ángulo de inclinación	± 27°
Intervalo de alcance	1,2m – 3,5m
Sistema de seguimiento	Seguimiento esquelético, pudiendo seguir hasta 6 personas y 20 articulaciones por jugador
Reconocimiento de voz	Si

- **Odriux XU4**

En la tabla 77 se muestran las especificaciones técnicas del microprocesador Odriux XU4, detalladas a continuación:

Tabla 77*Características técnicas del ODROID-XU4*

ODRIUX-XU4	
Procesador	Samsung Exynos5422 de 8 núcleos@2Ghz
Memoria ram	2GB DDR3
Procesador gráfico	GRÁFICOS MALI-T628 MP6
Almacenamiento	EMMC5.0 HS400 Flash Storage
Puertos USB	2 puertos USB 3.0 1 puerto USB 2.0
Tarjeta de red	GIGABIT ETHERNET 10/100/1000
Salida	HDMI
Botones de control	ENCENDIDO
Tamaño	(83x58x20) mm aproximadamente
Voltaje	5 V
Apto para servidores	LINUX, UBUNTU, WINDOWS 10 y ANDROID
Precio	90,00 USD

3.6.4. Subsistema 4: Vehículo Omnidireccional

En este subsistema se seleccionó a los elementos idóneos para ser parte de la plataforma omnidireccional, estos son:

- Placa Arduino Mega
- Sensor Ultrasónico
- Motor
- Rueda omnidireccional.

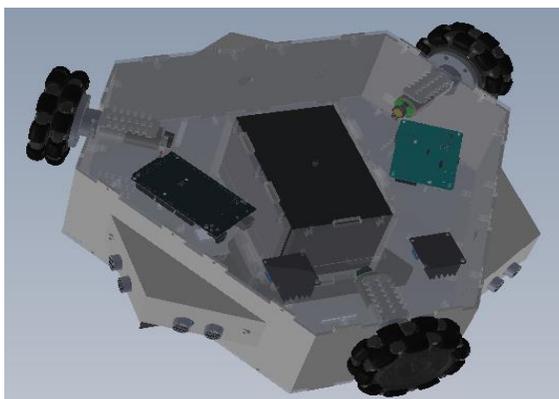


Figura 47. Vehículo Omnidireccional

A continuación, se muestra las características de cada uno de ellos

- **Placa de Fuente abierta - Arduino Mega**

Sus características técnicas se encuentran mencionadas en la tabla 78, presentada a continuación.

Tabla 78
Características Técnicas del Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560	
Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje Operativo	5V
Voltaje de Entrada	7-12V

CONTINÚA



Voltaje de Entrada (límites)	6-20V
Pines digitales de Entrada/Salida	54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
Pines análogos de entrada	16
Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida	40 Ma
Corriente DC entregada en el Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8KB usados por el bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad del reloj	6 MHz

- **Sensor Ultrasónico HC-SR04**

Sus características técnicas se encuentran en la tabla 79, presentadas a continuación.

Tabla 79

Características Técnicas de los sensores ultrasónicos HC-SR04

Sensor Ultrasonido HC-SR04	
Alimentación	5 V
Interfaz	Posee cuatro pines (Vcc, Trigger, Echo, GND)
Rango de medición	2 cm a 400 cm
Corriente de alimentación	15 mA
Frecuencia del pulso	40 Khz
Ángulo de medición	30°
Ángulo de medición efectivo	<15°
Duración mínima del pulso de disparo	10uS
Duración del pulso eco de salida	100-25000 μS
Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra	20 mS
Dimensiones del módulo	45x20x15 mm

- **Motor**

En el siguiente apartado se describirán las consideraciones y cálculos necesarios para la selección de los motores ubicados en el vehículo omnidireccional.

- Cálculos para el Modelo cinemático

Un vehículo omnidireccional posee la habilidad de desplazarse en cualquier dirección gracias a que incorpora ruedas omnidireccionales, las cuales están compuestas de ruedas normales con rodillos colocados de forma perpendicular respecto a la rueda. Al aplicar una fuerza lateral el vehículo se desplaza sobre los rodillos, generando una componente de velocidad en el eje x.

El modelo cinemático de este tipo de vehículos parte de un triángulo equilátero, donde se ubicará una rueda en cada vértice, dando como resultado 120 grados de separación entre cada una de las ruedas como se muestra en la figura 48.

Para la obtención de los parámetros se toma en consideración la distancia del centro del triángulo al centro de las ruedas y se denomina L , la velocidad angular de las ruedas se definirá como w_1, w_2, w_3 y el parámetro r representa el radio de las ruedas omnidireccionales.

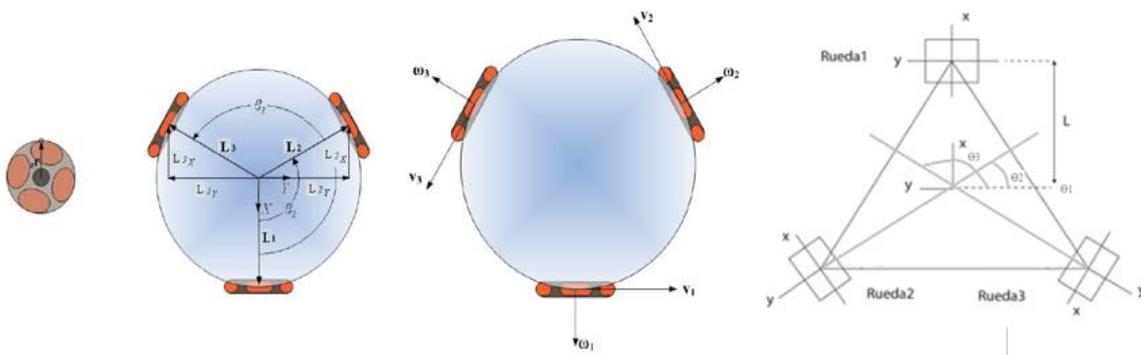


Figura 48. Esquema de la posición de las ruedas en un sistema de locomoción omnidireccional.

De acuerdo a su ubicación en el triángulo equilátero, los ángulos $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ toman los siguientes valores, $\theta_1=0^\circ, \theta_2=30^\circ, \theta_3=150^\circ$, para el vehículo implementado la distancia del centro de la rueda al centro del triángulo es $L=0.2\text{m}$ y el radio de la rueda corresponde a $r=0.05\text{m}$.

El modelo cinemático se presenta de manera directa e inversa. Del modelo cinemático directo se obtiene el desplazamiento y posición del vehículo con respecto a los ejes x, y, z, mediante la velocidad angular de las ruedas. Del modelo cinemático inverso se obtiene la velocidad angular de las ruedas a partir del desplazamiento con respecto a los ejes de coordenadas y la posición del robot.

A continuación, se detallan las ecuaciones que representan el modelo cinemático directo e inverso de un vehículo omnidireccional de 3 ruedas.

- **Modelo cinemático directo**

El modelo cinemático directo permite conocer la distancia de desplazamiento en los ejes de coordenadas y el sentido de giro de cada una de la rueda respecto a las otras.

Para este cálculo se define V_p como vector posición del vehículo y ϕ vector de velocidad, los cuales serán aplicados para el modelo cinemático directo e inverso y están definidos como:

$$V_p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para determinar el vector posición se utiliza la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_1 & 2\cos \theta_2 & -2\cos \theta_3 \\ -2\cos \theta_1 & 2\sin \theta_2 & 2\cos \theta_3 \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \quad (3)$$

Partiendo de la ecuación (3) se obtienen las siguientes ecuaciones para encontrar las coordenadas y el desplazamiento en x, y, z.

$$x = (\omega_1 \sin \theta_1 + \omega_2 2 \cos \theta_2 - \omega_3 2 \cos \theta_3) * \frac{r}{3} \quad (4)$$

$$y = (-\omega_1 2 \cos \theta_1 + \omega_2 2 \sin \theta_2 + \omega_3 2 \cos \theta_3) * \frac{r}{3} \quad (5)$$

$$z = (-\omega_1 1/L - \omega_2 1/L - \omega_3 1/L) * \frac{r}{3} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{r}{3} * \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -2 & 1 & 1 \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

La ecuación (7) representa el modelo cinemático directo, en donde el desplazamiento de la Rueda1 corresponde a los valores de la primera columna de izquierda a derecha de la matriz 3x3, la Rueda2 a la segunda columna y la Rueda3 a la tercera. Además, se aprecia que el valor que toma x está dado por la primera fila de arriba hacia abajo, la segunda y tercera fila representa el valor de y, z respectivamente. Para realizar el análisis del desplazamiento se debe asignar valores a las variables de velocidad angular de cada rueda, es decir a ω_1 , ω_2 , ω_3 .

Primero se calcula el desplazamiento de las ruedas cuando el vehículo omnidireccional rota sobre sí mismo, para lograr este análisis es necesario asignar los siguientes valores a las variables de velocidad angular:

$$\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 1$$

Remplazando en las ecuaciones (4), (5), (6), se obtiene:

$$x = \left((1 * 0) + (1 * \sqrt{3}) + (1 * -\sqrt{3}) \right) * \frac{0.05m}{3} = 0m$$

$$y = \left(-(1 * 2) + (1 * 1) + (1 * 1) \right) * \frac{0.05m}{3} = 0m$$

$$z = \left(-\frac{1}{0.2} - \frac{1}{0.2} - \frac{1}{0.2} \right) * \frac{0.05m}{3} = -0.25m$$

Se visualiza que al reemplazar la velocidad angular en cada una de las ruedas de un sentido positivo se logra el movimiento únicamente en el eje de coordenadas z, esto corresponde a la rotación del robot, el signo de la componente negativa, lo cual permite conocer que el giro fue hacia la derecha como muestra la figura 49.

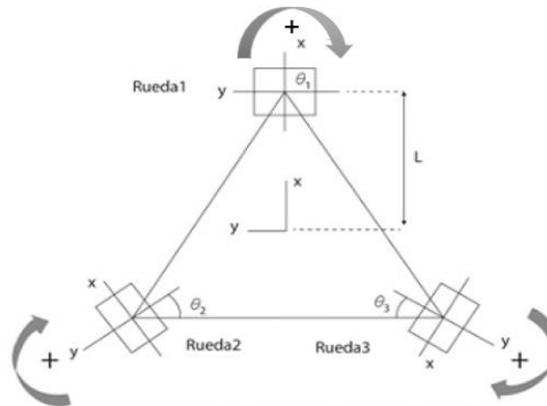


Figura 49. Rotación del robot en sentido horario.

Para realizar un desplazamiento del vehículo omnidireccional hacia adelante es necesario reemplazar el valor de ω_2 , ω_3 correspondientes a la Rueda 2 y 3 respectivamente, para incluir el sentido de giro se hace uso del signo según corresponda. A la Rueda1 toma el valor de cero ya que esta se desplazará sobre los rodillos que posee la rueda omnidireccional, es decir que será “arrastrada” por el desplazamiento de los motores conectados a las Ruedas2 y 3.

$$\omega_1 = 0, \omega_2 = 1, \omega_3 = -1$$

$$x = (0 + (1 * \sqrt{3}) + (-1 * -\sqrt{3})) * \frac{0.05m}{3} = 0.058m$$

$$y = (0 + 1 - 1) * \frac{0.05m}{3} = 0m$$

$$z = \left(0 - \frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.2}\right) * \frac{0.05m}{3} = 0m$$

Los resultados señalan que el robot se desplazó solo en el eje x 0.058m, correspondientes a 5,8cm como se muestra en la figura 50.

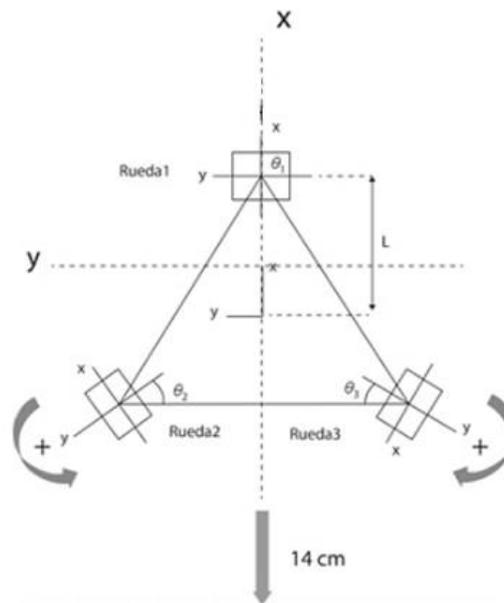


Figura 50. Desplazamiento hacia adelante del robot

Los motorreductores cilíndricos de CC con escobillas están disponibles en el mercado en una amplia gama de relaciones de engranajes y con cinco motores diferentes, es decir dos niveles de potencia de motores de 6 V y tres niveles de potencia de motores de 12 V. Todos los motorreductores tienen caja de diámetro y eje de salida semejante, por lo que generalmente es fácil cambiar una versión por otra si cambian los requisitos de diseño, cabe señalar que la

longitud de la caja de cambios tiende a aumentar con la relación de engranajes. Todas las versiones también están disponibles con un codificador de cuadratura de 48 CPR integrado en el eje del motor.

A continuación, se muestran los motores que por sus características pueden ser comparados con el fin de seleccionar el más idóneo, siendo una de las características más relevantes la tensión nominal.

Tabla 80

Comparación de Motores con tensión nominal 2.1 Amperios

Tensión nominal	Tipo de motor	Estancar actual @Tensión nominal	Velocidad sin carga a voltaje nominal	Torsión de paro aproximado a voltaje nominal	 Pololu Con encoder	 Pololu Sin codificador
12V	Potencia media (MP)	2.1 A	7800 RPM	2.7 oz-in	1: 1 MP 12 V w/ encoder	
			1700 RPM	11 oz-in	4.4: 1 MP 12 V w/ encoder	4.4: 1 MP 12V
			770 RPM	22 oz-in	9.7: 1 MP 12 V w/ encoder	9.7: 1 MP 12V
			370 RPM	42 oz-in	20.4: 1 MP 12 V w/ encoder	20.4: 1 MP 12V
			220 RPM	63 oz-in	34: 1 MP 12 V w/ encoder	34: 1 MP 12V
			160 RPM	85 oz-in	47: 1 MP 12 V w/ encoder	47: 1 MP 12V
			100 RPM	125 oz-in	75: 1 MP 12 V w/ encoder	75: 1 MP 12V
			76 RPM	165 oz-in	99: 1 MP 12 V w/ encoder	99: 1 MP 12V
			43 RPM	250 oz-in	172: 1 MP 12 V w/ encoder	172: 1 MP 12V
			33 RPM	320 oz-in	227: 1 MP 12 V w/ encoder	227: 1 MP 12V

Mediante los cálculos obtenidos se establece al motor Pololu del modelo Motorreductor de metal 75: 1 25Dx66L mm MP 12V con codificador de 48 conteos por revolución (CPR), como el

más idóneo debido a que cumple con las características para ser incorporado en la plataforma móvil diseñada, a continuación, se describen las especificaciones técnicas que poseen los motores.

Este motorreductor consta de un motor de CC de 12 V con escobillas de potencia media combinada con una caja de engranajes cilíndrica de 74.83: 1, y tiene un codificador de cuadratura de 48 CPR integrado en el eje del motor, que proporciona 3591.84 conteos por revolución del eje de salida de la caja de engranajes. Las dimensiones y demás características se pueden observar en el Anexo 1.

- **Rueda omnidireccional**

Para la implementación de la plataforma omnidireccional se eligieron 3 ruedas omnidireccionales de material plástico debido a:

- Su alta resistencia al desgaste que se provocan por frenazos bruscos y suelos irregulares.
- Su gran resistencia a la abrasión
- Su baja resistencia al arranque y a la rodadura (inferior en un 30% comparada con bandas similares de goma).
- Además, las ruedas de plástico no ensucian ni estropean el suelo por donde circulan, presentan buena resistencia y amortiguación a los choques y a las vibraciones.
- Son de rodar silencioso y elástico.
- Resisten a los agentes atmosféricos, aceites, grasas, gasolinas, hidrocarburos, azúcar, propano, butano, oxígeno, entre otros.

3.7 Diseño final

Una vez realizado el diseño de todos los componentes seleccionados para la plataforma móvil omnidireccional se procede a ensamblar el dispositivo, el cual se construirá utilizando procesos esquematizados, cabe indicar que todos los materiales a utilizar poseen un gran porcentaje de adquisición. De las figuras de las 51 a la 54 se muestran las principales características de la plataforma móvil omnidireccional.

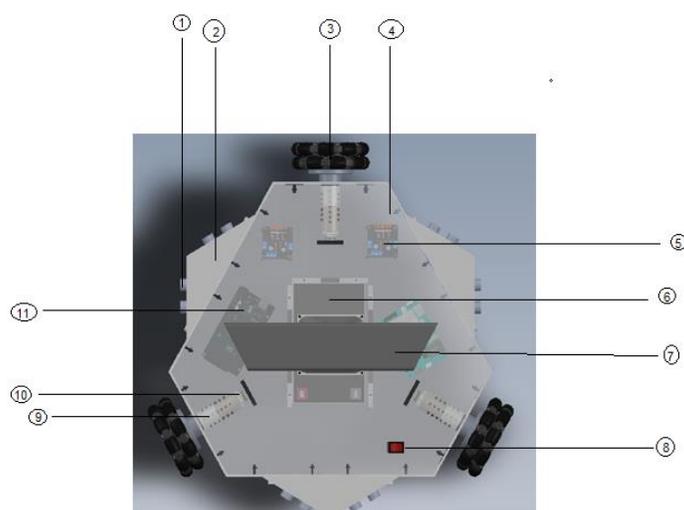


Figura 51. Vista aérea de los elementos que conforman la plataforma por cada piso

Tabla 81

Detalle de componentes de la plataforma móvil

Número	Descripción del componente	Módulo
1	Sensor ultrasónico	Navegación reactiva
2	Base para los sensores	Estructura
3	Rueda omnidireccional	Base
4	Cara superior de la plataforma	Estructura
5	Puente H	Odometría
6	Batería	Energético
7	Kinect	Navegación
8	Switch	-
9	Motor	Tracción
10	Encoder	Tracción
11	Tarjeta Arduino	Adquisición y mando

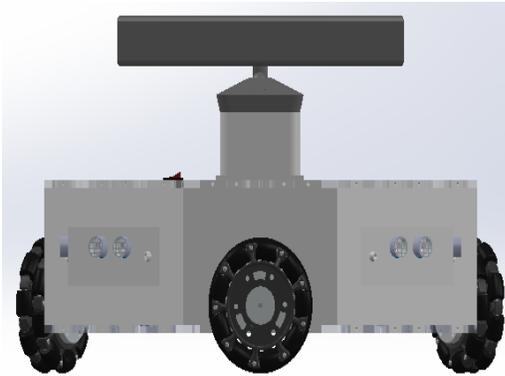


Figura 52 Vista posterior de los elementos de la Plataforma omnidireccional

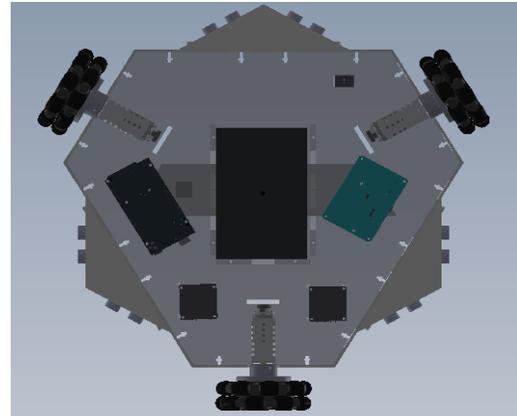


Figura 53. Vista inferior de la Estructura

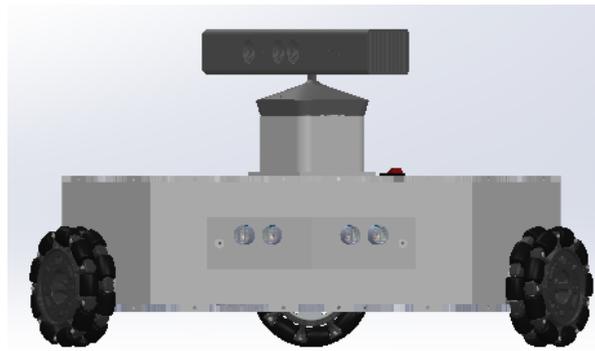


Figura 54. Vista lateral de la Plataforma móvil omnidireccional

3.8 Resumen

Las matrices de selección ayudaron a identificar la mejor alternativa para diseñar cada subsistema, las necesidades se evaluaron y agruparon permitiendo identificar las características técnicas más idóneas de los diferentes dispositivos que conformaran la plataforma móvil omnidireccional.

Se obtuvieron cinco subsistemas los cuales son: 1) Estructura, 2) Energía, 3) Mapeo y Localización, 4) Vehículo omnidireccional, 5) Acceso remoto PC.

La plataforma móvil omnidireccional cuenta con las siguientes alternativas, sistema de ruedas omnidireccionales, estructura robusta, sistema de detección de obstáculos con ultrasonidos, sistema de mapeo de objetos en tres dimensiones, interfaz de visualización de resultados.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En el presente apartado se describe la construcción de los componentes tanto mecánicos como electrónicos de la plataforma omnidireccional, al igual que las pruebas de funcionamiento.

4.1. Estructura

La plataforma móvil se encuentra construida en acrílico transparente de 6mm para las bases inferior y superior, y para las caras laterales de acrílico de 3mm.

4.1.1. Corte de la estructura

Por la forma de cada lado de la plataforma omnidireccional, y que requieren dejar cavidades para tornillo y accesorios, es justo efectuar el corte del acrílico en láser con el objetivo de obtener medidas precisas y sin perturbar las propiedades del material.

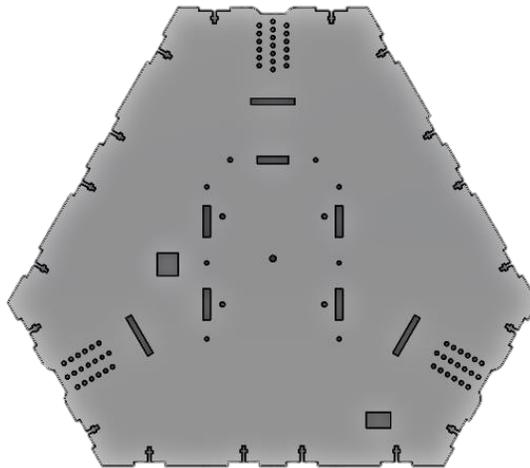


Figura 55. Impresión de la estructura

4.1.2 Unión de la estructura

Cada una de las caras se unen minuciosamente mediante tornillos como se puede observar en la figura 56, para obtener la forma deseada, misma que se visualiza en la figura 57.



Figura 56. Unión de la estructura

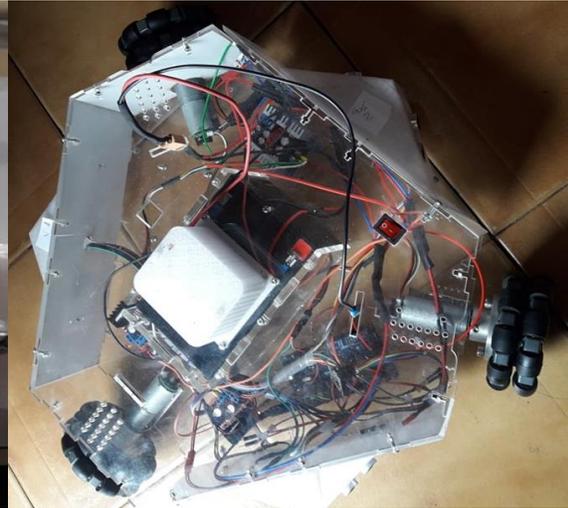


Figura 57. Forma de la estructura

Acople de motores

A continuación, se realizó el acople de las 3 ruedas, las cuales se situaron a los costados del robot, junto a estas se añadió los encoders que tienen el cargo de proporcionar datos del recorrido que realiza el robot. Los motores que se seleccionaron son ensamblados a otros elementos mecánicos con la utilización de un tornillo prisionero, permitiendo la correcta sujeción de los componentes para generar el movimiento desde el motor hacia la rueda.

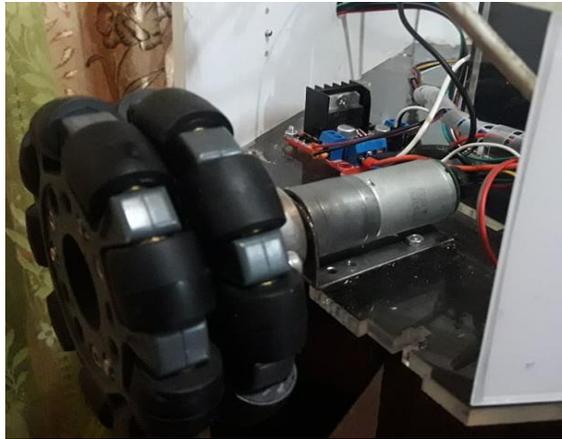


Figura 58. Acople de motores

Montaje de motores

Los motores para cada rueda fueron acoplados por medio de tornillos M3 a la placa frontal, misma que posee dos orificios de montaje roscados, donde se utilizó un soporte de motorreductor de metal de 25D mm, lo cual se puede visualizar en la figura 59.



Figura 59. Ensamblaje de motores

Sujeción de los elementos

Fue importante mantener la estabilidad de los dispositivos tales como los drivers, la tarjeta Arduino, el puente H, entre otros, en el interior de la plataforma, para impedir posibles problemas

de desconexión o averías en los mismos, esto se logró con la utilización de tornillos como se pueden observar en la figura 60.

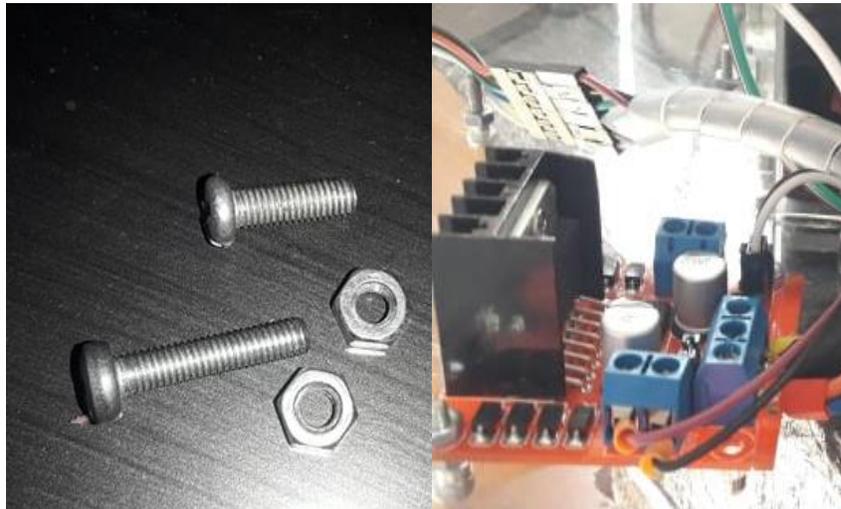


Figura 60. Sujeción de los elementos.

Impresión de las bases de los sensores

Los sujetadores de los sensores ultrasónicos fueron realizados en una impresora 3D con tereftalato de polietileno glicolizado conocido como PETG a un porcentaje de relleno de 20% en capas de 0,3mm, dándole una forma triangular para una adecuada distribución de los sensores, identificado en la figura 61.



Figura 61. Impresión de las bases de los sensores

Para la correcta localización del robot en el entorno es importante el uso de varios sensores ultrasónicos, ubicados de forma estratégica para captar los objetos cercanos en toda dirección. Es

por ello que se ha colocado 6 sensores ultrasónicos, con disposición de dos sensores a cada costado a 90 grados como se puede observar en la figura 62, determinando que los mismos deben apuntar a distintas direcciones y a una distancia prudente para evitar interferencia entre ellos.

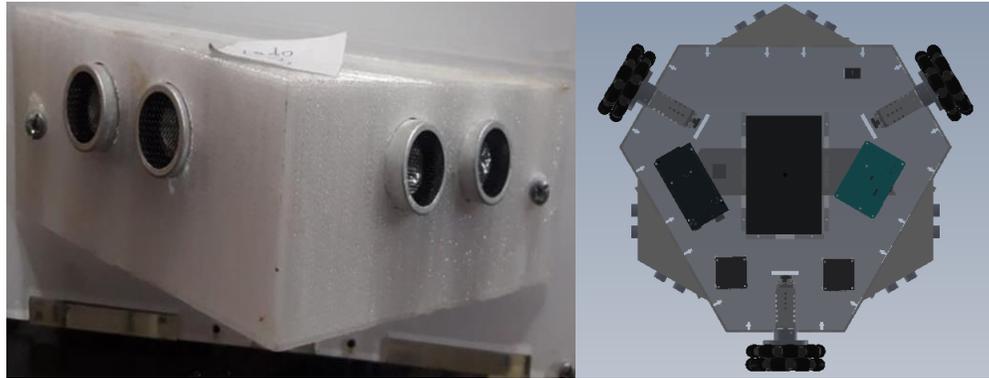


Figura 62. Ubicación de los sensores

4.1.3. Unión del sistema electrónico.

La conexión de dispositivos electrónicos se enfoca al uso de controlares Arduino para manejo de motores, sensores y comunicación de radiofrecuencia.

Conexión de radiofrecuencia RF

Para la comunicación RF entre dos los Arduino Mega y Arduino UNO se elige el módulo NRF24L01 el cual integra un transceptor RF (transmisor + receptor) utilizando una frecuencia entre 2.4GHz a 2.5GHz y la velocidad de transferencia de datos es adaptable para 250 Kbps, 1Mbps, y 2 Mbps. Dos módulos RF son los que interactúan entre sí, cada uno conectado en un controlador. Para la conexión en el Arduino Mega se usan los pines 50, 51 y 52, de las salidas digitales para los pines MISO, MOSI Y SCK del módulo RF respectivamente. Para los pines CE y SCK se usan las salidas PWM 9 y 10 respectivamente, a la vez la respectiva conexión de 3,3 V y GND, lo cual se puede visualizar en la Figura 63. En el caso del Arduino UNO se

conecta el joystick shield V2 como se muestra en la Figura 64, esta shield integra un puerto específico para el módulo NRF24L01.

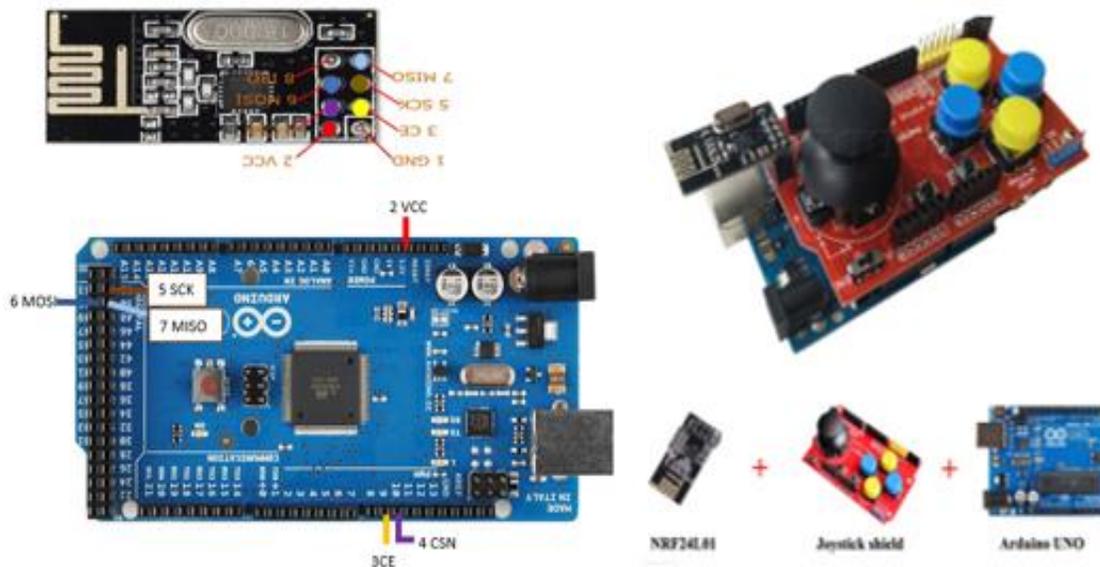


Figura 63. Comunicación de radiofrecuencia.

Conexión Motor - Puente H - Arduino

De acuerdo a la conexión requerida para el funcionamiento de los motores, se tiene dos puentes H que tienen cuatro entradas lógicas cada uno, 12 V de entrada, GND, una salida de 5 V lógicos y las conexiones a los bornes del motor. Además de ello se posee dos jumpers de activación para cada motor y jumper regulador. El canal A es usado para establecer el sentido de giro y el canal B que es el PWM encargado de suministrar el control de potencia a los motores y los dos se conectan a pines digitales del Arduino Mega, por lo que fue necesario que los canales B de cada puente H se conecten a los pines digitales dotados de PWM. Finalmente se tiene el encoder, el mismo que se fija al motor y posee 4 pines, de ellos, dos son para la alimentación, 5V y GND, y los otros dos pines son las salidas del dispositivo, es decir los canales A y B. Para mayor claridad se representa el esquema en la figura 64.

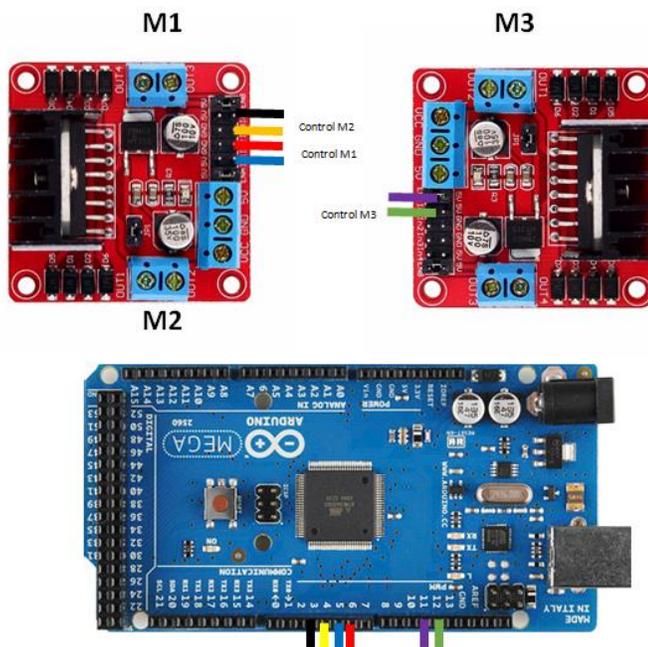


Figura 64. Conexión Motor - Puente H – Arduino

4.1.4. Mapeo: Crear, Guardar y Cargar

Una vez que se ha establecido la conexión con la PC, la plataforma espera recibir la instrucción para iniciar que en este caso es con el pulsador del módulo Joystick configurado previamente, en cuanto se ejecuta dicha instrucción se activa los motores hacia adelante y mantener este estado mientras no detecte objetos a 15 cm de distancia frente a él. Cuando se detecta cualquier objeto a la distancia establecida, la plataforma busca la manera de evitar la colisión, realizando movimientos en diferentes direcciones. Se recalca que en caso de que la plataforma haya girado 180° y de igual forma siga detectando algún obstáculo, se dará la orden de activación del sensor lateral y el timer encargado de enviar los datos que se han obtenido para lograr el mapeo de un espacio pequeño, aunque el proceso de giro seguirá hasta que el sensor delantero deje de detectar obstáculos a 15 cm.

En el transcurso de este proceso se observan los valores que recoge el sensor lateral, de tal manera que, si la distancia al obstáculo es superior a 15cm, la plataforma rectifica la distancia

acelerando o frenando los motores del lado que corresponde, de no ser así se mantendrá la velocidad a la que se está desplazando. El proceso que se describió en líneas anteriores se ejecutará únicamente si el sensor principal no detecta ningún obstáculo a una distancia de 15cm. En caso contrario detendrá los motores y se realiza el giro a la izquierda de acuerdo al mismo principio que se ha explicado.

Este ciclo únicamente finalizará cuando se le envíe la instrucción de detenerse, sino seguirá repitiendo las veces que se requiera. Este proceso se halla explicado en el diagrama que se presenta en la Figura 65 a continuación:

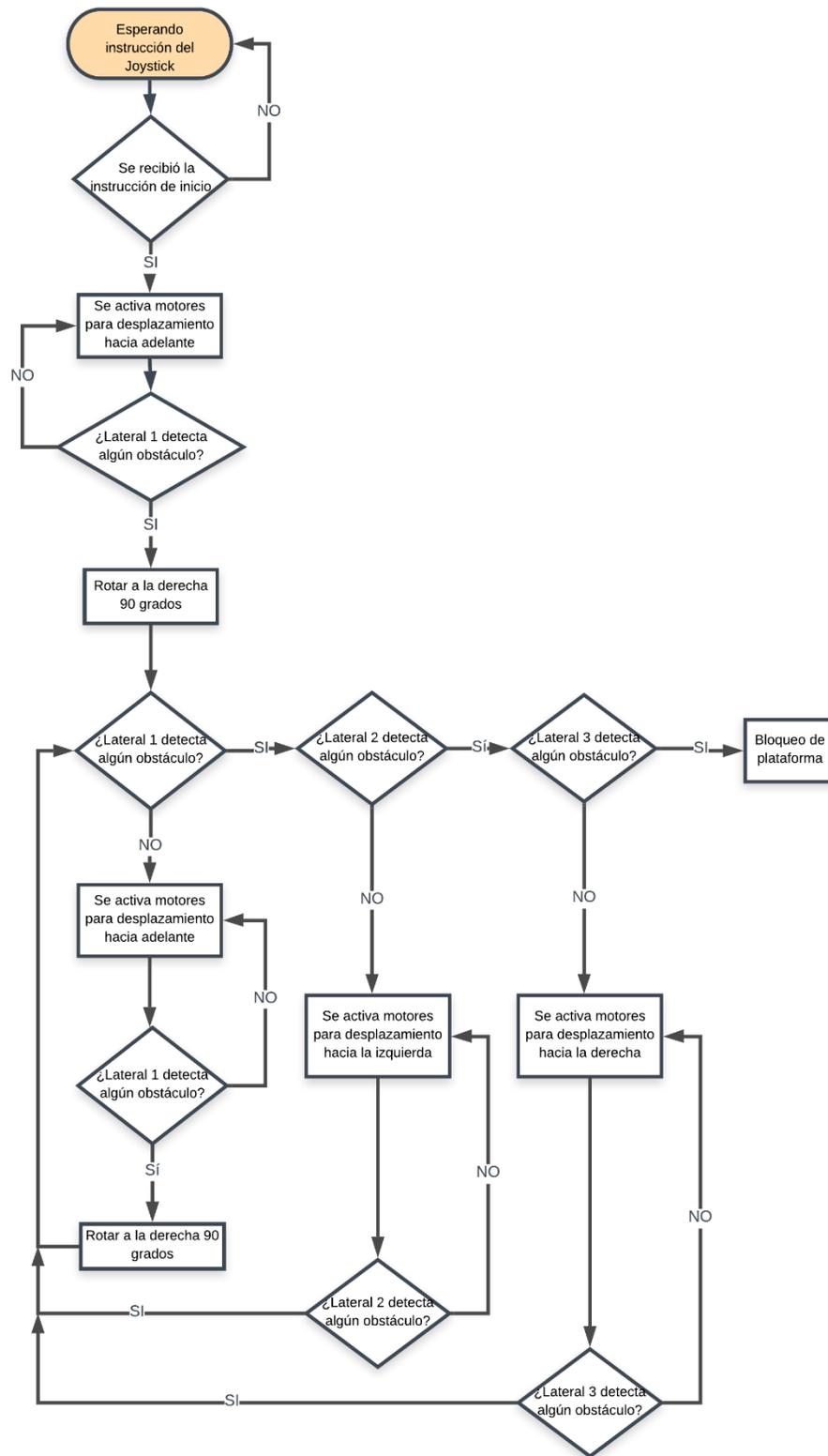


Figura 65. Algoritmo de mapeo para el modo Automático

La plataforma robótica móvil en su modo autónomo realiza la localización y mapeo simultáneo (SLAM), para poder implementar el SLAM se hace uso del paquete ROS (Robot Operating System) por medio del cual se fusiona los elementos del robot con el sistema de control.

Una vez que la plataforma omnidireccional empieza a moverse, la herramienta de visualización “rviz” permite apreciar la imagen captada por la Kinect como se visualiza en las figuras 66 y 67, y por medio de la herramienta rtabamap se procede al mapeo, de forma automática se guarda en una base de datos con extensión .db.

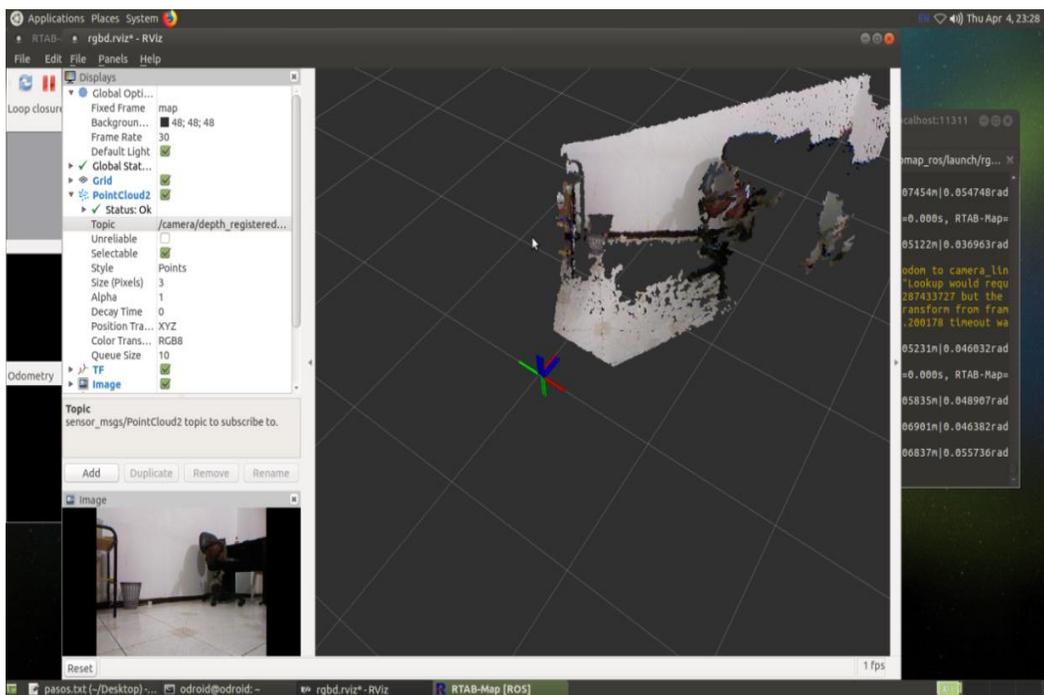


Figura 66. Visualización del proceso de creación del mapeo

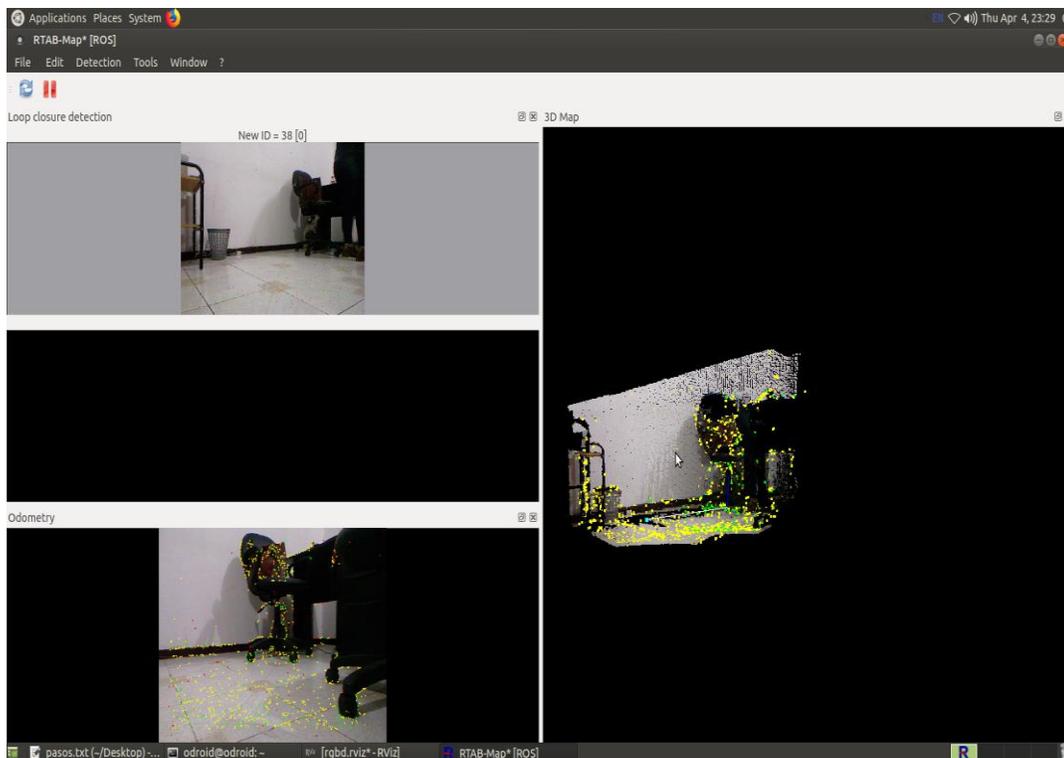


Figura 67. Visualización del proceso de creación del mapeo

Control interfaz humano máquina

Para la aplicación de escritorio se utilizó el lenguaje de programación C#, el mismo que utilizó una cadena de conexión para conectar a sqlite, que es el tipo de base de datos donde se almacena el mapeo.

La información generada durante el mapeo es presentada en un archivo .db para posteriormente ser interpretado en C#. Estas tablas se crean automáticamente y son las que se pueden apreciar en la figura 68. Dentro de todas estas informaciones la más relevante es la carpeta Data que contiene datos específicos de los landmarks o puntos de relevancia.

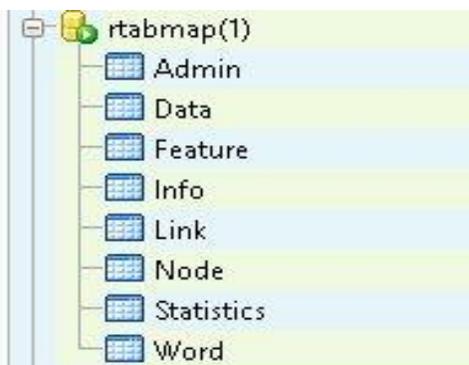


Figura 68. Tablas que se crean automáticamente al generar el mapeo

Una vez tomados los valores del movimiento de la plataforma por la Kinect se pudo elaborar una interfaz de acceso para visualizar los datos guardados, tales como la posición en x, la posición en y, y la distancia de un punto a otro como se puede visualizar la figura 69.



Figura 69. Interfaz de acceso

Una vez que se ingresa a la interfaz se puede visualizar el menú de opciones, que es el que se presenta en la figura 70.



Figura 70. Menú principal

Botón recorrido: Muestra en la pantalla principal la distancia total recorrida de la plataforma, como se puede visualizar en la figura 71. La plataforma contiene un plano de dirección, es decir,

la parte frontal de la Kinect es el norte de trabajo, si se rota la plataforma la dirección se mantiene, por ende, la gráfica de recorrido continuará siendo lineal.

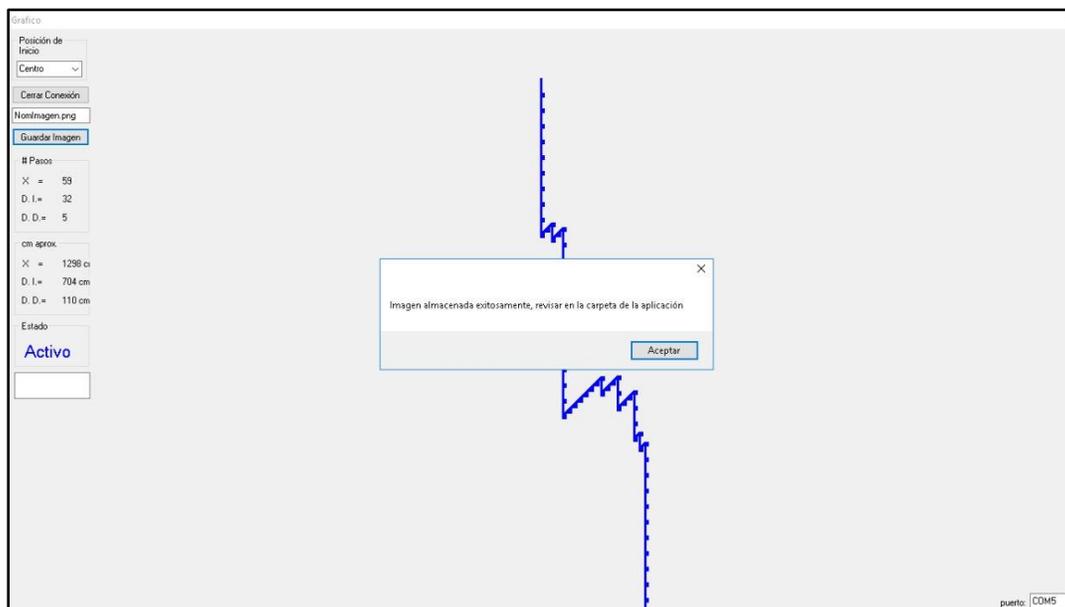


Figura 71. Recorrido de la plataforma

Cuando la plataforma en estado automático presenta inmovilidad, se despliega un mensaje de error en la pantalla, así como se muestra en la figura 72. El error se genera a partir de la recepción de datos de distancias semejantes en varias direcciones durante un determinado tiempo, si no existe cambio la plataforma se bloquea hasta su posterior reactivación.

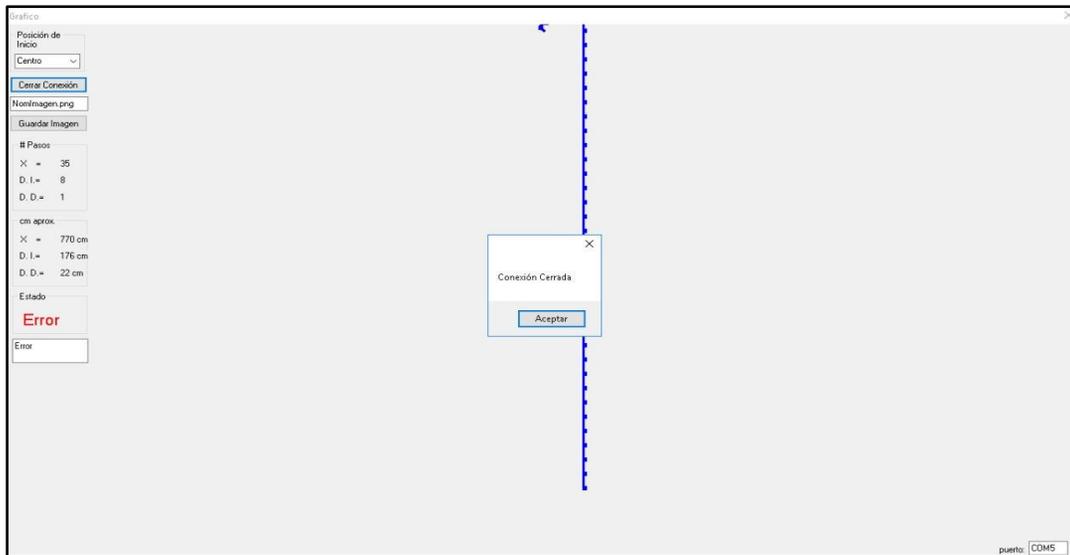


Figura 72. Error en el movimiento de la plataforma

Botón base de datos: Muestra los datos más notables luego del mapeo como se muestra en la figura 73. Dentro de este archivo se encuentra el despliegue de información de los landmarks, el número de imagen en el que se encuentra, su número de asignación dado por la Kinect, y su posición en el plano XYZ.

Imagen	Punto	Posicion X	Posicion Y	Distancia X [cm]
1	433	343	110	3,07766639790955
1	432	43	165	1,70390003242493
1	431	247	274	1,62000000476837
1	430	62	159	1,67900013922645
1	429	36	205	1,51443767547607
1	428	157	309	1,45537507534027
1	427	97	195	1,61800003051758
1	426	551	70	4,246437545959106
1	425	93	148	1,82687520980835
1	424	212	206	2,687199831100891
1	423	580	167	7,6080002784729
1	422	53	150	1,67449988855591
1	421	70	177	1,50675010681152
1	420	259	54	3,02575016021729
1	419	113	211	1,70389231700897

Figura 73. Base de datos de la plataforma

Botón medidas: Permite calcular la distancia entre dos puntos de una imagen captada por la Kinect, lo mismo que se visualiza en la figura 74. La medida obtenida por la interfaz está dada a partir de la selección de dos landmarks y la distancia que los separa, esto se compara con la medida real y se verifica la fiabilidad de mapeo.

Medidas

ESPE Diego Xavier Chuquitarco Mallitasig
 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS Stalin Santiago Quimbita Bedon
 INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Ingresar Datos

Punto 1
 Id:
 Punto:

Punto 2
 Id:
 Punto:

Posiciones

Punto 1
 X: 1,80062508583069
 Y: 0,478038728237152
 Z: 0,118326790630817

Punto 2
 X: 4,22387504577637
 Y: -1,59375417232513
 Z: 0,17297774553299

Resultado
 Distancia: 3,18864436995861 cm - 0,637266046707002

Figura 74. Botón medidas

4.2 Pruebas de funcionamiento

Para las pruebas de funcionamiento de la plataforma móvil omnidireccional como se puede apreciar en el Anexo 3, se tabula de acuerdo al número de entorno. Existen cuatro entornos, y en cada uno de ellos se realizan tres pruebas de mapeo. Las pruebas consisten en seleccionar dos elementos, siendo cada elemento la distancia entre dos puntos dentro del entorno. Se compara los valores obtenidos con los valores reales y se obtiene el porcentaje de error de medida. Una vez comparados los valores en cada prueba se determina que se puede obtener resultados similares sin importar el entorno en el que se mueva la misma, presentándose los siguientes valores:

Tabla 82*Valores de errores en las medidas de imágenes mapeadas en modo teleoperado*

Modo Teleoperado			
N° Entorno	N° Prueba	N° Elemento	% Error
entorno 1	prueba 1	Elemento 1	0%
		Elemento 2	2,50%
entorno 2	prueba 1	Elemento 7	4,44%
		Elemento 8	1,63%
	prueba 2	Elemento 9	0,82%
		Elemento 10	3,22%
	prueba 3	Elemento 11	2,38%
		Elemento 12	1,30%
entorno 3	prueba 1	Elemento 13	5,16%
		Elemento 14	3,52%
	prueba 2	Elemento 15	0,82%
		Elemento 16	1,37%
	prueba 3	Elemento 17	2,63%
		Elemento 18	1,05%
entorno 4	prueba 1	Elemento 19	1%
		Elemento 20	1,66%
	prueba 2	Elemento 21	1,50%
		Elemento 22	0,00%
	prueba 3	Elemento 23	1,42%
		Elemento 24	0,46%

Fuente: Pruebas de funcionamiento

Tabla 83*Valores de errores en las medidas de imágenes mapeadas en modo automático*

Modo automático			
N° Entorno	N° Entorno	N° Entorno	% Error
entorno 1	prueba 2	Elemento 3	2,56%
		Elemento 4	0,93%
	prueba 3	Elemento 5	2,75%
		Elemento 6	1,79%

Fuente: Pruebas de funcionamiento

En las figuras que se muestran a continuación se puede observar el mapeado que realizó la plataforma móvil omnidireccional en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.

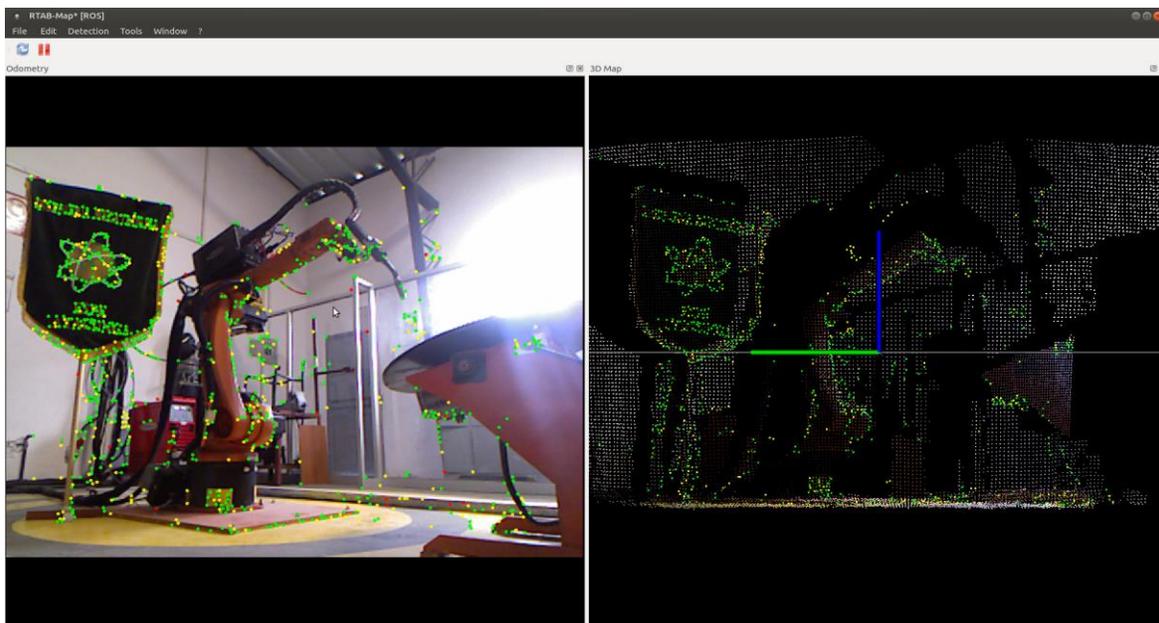


Figura 75. Prueba 1- Mapeado de la plataforma móvil omnidireccional en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.

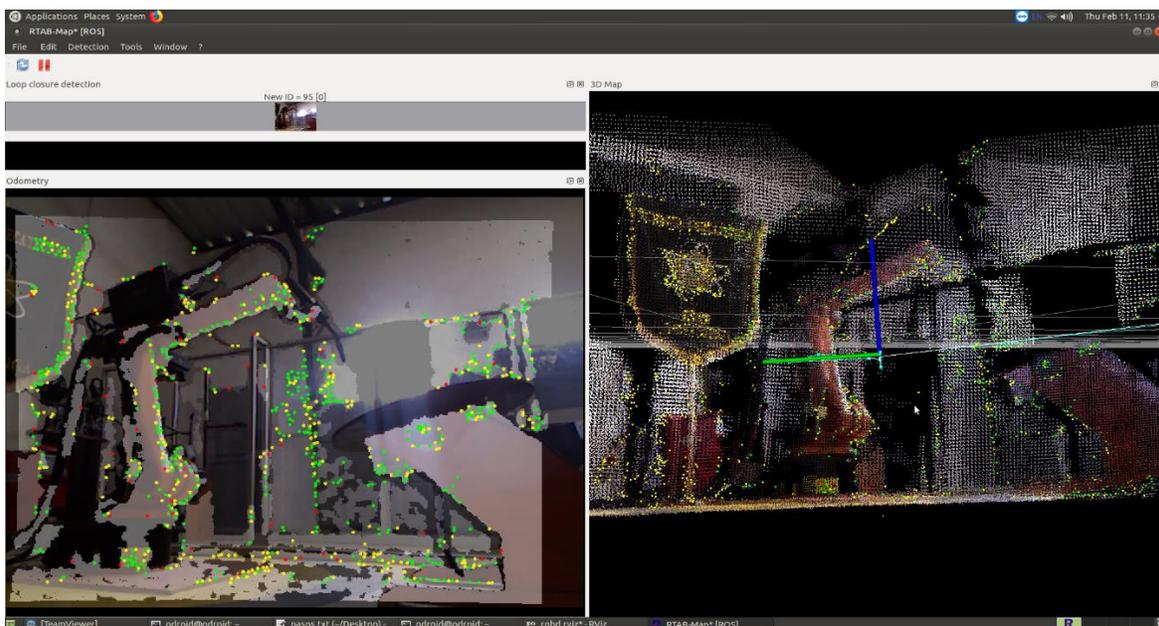


Figura 76. Prueba 2- Mapeado de la plataforma móvil omnidireccional en el Laboratorio de Robótica de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.

4.3 Validación de la hipótesis

Para determinar la factibilidad de la plataforma se requiere utilizar el método estadístico T-student, con lo cual se puede comprobar la eficiencia del robot al momento de realizar el mapeo.

La hipótesis que se plantea para el proyecto es la siguiente:

¿El diseño y construcción de la plataforma móvil omnidireccional permitirá la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga?

Tabla 84

Condiciones para la hipótesis

Hipótesis alternativa	Condición de validación
$\mu > \mu_o$	$T > t_{\alpha}$
$\mu < \mu_o$	$T < -t_{\alpha}$
$\mu = \mu_o$	$T < -\frac{t_{\alpha}}{2} \text{ o } T > \frac{t_{\alpha}}{2}$

Donde T representa el valor de la distribución calculado y t_{α} es el valor de distribución normal del T student establecida.

Validación de la hipótesis para el mapeo en modo teleoperado

H0= El diseño y construcción de la plataforma móvil omnidireccional no permitirá la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D

H1= El diseño y construcción de la plataforma móvil omnidireccional permitirá la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D

La validación se inicia con los valores de la tabla de frecuencias observadas, de las medidas obtenidas durante el mapeo:

Tabla 85*Frecuencias observadas*

N°	X	$X - \bar{X}$	$(X - \bar{X})^2$
1	1,0008	0,544	0,296
2	0,205	-0,252	0,063
3	0,432	-0,025	0,001
4	0,617	0,160	0,026
5	0,321	-0,136	0,018
6	0,48	0,023	0,001
7	0,343	-0,114	0,013
8	0,699	0,242	0,059
9	0,163	-0,294	0,086
10	0,44	-0,017	0,000
11	0,371	-0,086	0,007
12	0,664	0,207	0,043
13	0,185	-0,272	0,074
14	0,192	-0,265	0,070
15	0,396	-0,061	0,004
16	0,305	-0,152	0,023
17	0,609	0,152	0,023
18	0,341	-0,116	0,013
19	0,715	0,258	0,067
20	0,658	0,201	0,040
\bar{X}	0,457	$\sum (X - \bar{X})^2$	0,9276

Para obtener el valor calculado de la distribución de T-Student se hace uso de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} =Porcentaje de error medio

μ_0 = Porcentaje de error esperado

S= desviación estándar

N= Número de muestras

Para el cálculo de la desviación estándar se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Una vez que se ha calculado el promedio de los porcentajes con un total de n=20 muestras, se determina que $\bar{X} = 0,457$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,92}{19}}$$

$$S = \sqrt{0,048}$$

$$S = 0,22$$

Reemplazando los datos de la ecuación del T student se puede tener el siguiente valor:

$$T = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

$$T = \frac{0,457 - 0,05}{\frac{0,22}{\sqrt{20}}}$$

$$T = \frac{0,407}{\frac{0,22}{4,47}}$$

$$T = 8,3$$

Para conocer el valor de t_{α} , utilizando los 19 grados de libertad que representa el número de mediciones realizadas menos uno ($gl = n - 1$), y con un nivel de significancia de 0,05, se utiliza la tabla de distribución del T-Student, de acuerdo a lo cual da como resultado $t_{\alpha} = 1,729$. Luego comprobando con las condiciones de la tabla, se obtiene que:

$$T > t_{\alpha}$$

$$8,3 > 1,729$$

Por lo tanto, se puede determinar que se acepta la hipótesis alternativa, es decir: El diseño y construcción de la plataforma móvil omnidireccional permitirá la generación tridimensional fiable de entornos cerrados utilizando tecnología SLAM 3D.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se analizó y determinó de forma teórica y práctica que los beneficios de la tecnología SLAM 3D permiten el funcionamiento óptimo y fiable de un robot móvil en entornos cerrados y estables, además la recopilación de información, permitió la implementación de ideas novedosas en el proyecto realizado gracias a la actualización de datos sobre los adelantos de la misma en el sector nacional y mundial.

De acuerdo al estudio realizado, se determinó que en el ámbito de la robótica móvil los robots omnidireccionales poseen una de las estructuras más eficientes para realizar movimientos laterales, frontales, rotacionales sobre superficies planas, puesto que un sistema omnidireccional posee la misma cantidad de posicionamientos posibles que la cantidad de coordenadas necesarias para localizar un vehículo de forma única en un plano, ayudando así a una generación tridimensional inmejorable.

Se diseñó y construyó una plataforma móvil omnidireccional en acrílico transparente de 6mm para las bases inferior y superior, y para las caras laterales de acrílico de 3mm, que es material más apropiado para el soporte de todos los componentes, entre ellos los sensores de distancia ultrasónicos que son adecuados para la detección de obstáculos y paredes cerradas, una tarjeta embebida para el levantamiento del mapa tridimensional y una batería seca que permite tiempo suficiente de duración para el correcto funcionamiento del sistema.

El algoritmo utilizado para el desarrollo de la plataforma móvil se basa en RGBD-SLAM, proceso que suministra la posición actualizada de la Kinect y crea una nube de puntos del entorno, es decir un trabajo conjunto entre posición y mapeo. Durante todo el proceso, este enfoque va guardando la información de los landmarks encontrados para su posterior análisis, es decir la evolución de medidas entre dos puntos.

La plataforma robótica móvil omnidireccional usó el sistema operativo ROS (Robot Operating System) para el control de 3 subsistemas: el acceso remoto, la locomoción omnidireccional y el mapeo y localización. Este sistema operativo permite la autonomía del robot, a partir del control de nodos creados en los subsistemas, además accede a una evaluación y administración segura de los datos obtenidos gracias a su sistema robusto y la lógica jerárquica que se maneja.

Para la validación del sistema se valoró el diseño de la plataforma robótica móvil en diferentes entornos. El principal factor a considerarse fue la luminosidad generada en el ambiente, teniendo en consideración dos aspectos: luz artificial o natural. En ambos casos la obtención de datos fue satisfactoria con una variación de margen de error de medida relativamente bajo, dando por hecho que el sistema cumple los estándares planteados al inicio del proyecto.

Se identificó la fiabilidad de la generación tridimensional al efectuar pruebas comparativas asociadas a medidas reales y medidas obtenidas en el mapeo. De acuerdo a las pruebas realizadas, tanto en la reconstrucción en modo teleoperado como en el modo automático se comprobó que existió una diferencia mínima en la medida, tomando como ejemplo el entorno uno prueba dos, donde se obtiene una medida real de 0,145 m y una calculada de 0,141 m es decir una variación mínima de 0,004 m que significa un porcentaje minúsculo de falla, teniendo como resultado que la plataforma omnidireccional cumple de forma adecuada con los objetivos esperados.

5.2 RECOMENDACIONES

Para solucionar la aparición de errores es necesario establecer ciertos parámetros de identificación de landmarks entre estos están aspectos como: empezar la identificación de puntos con la base de datos encerrada, además suele incorporarse procedimientos como la validación de landmarks mediante el reconocimiento del mismo punto de referencias varias veces.

Es importante señalar que a pesar de que la plataforma omnidireccional posee 6 sensores ultrasónicos, no se puede detectar todos los obstáculos que se le presentan, un mejor posicionamiento o la inclusión de más y nuevos sensores que colaboren con la odometría mejorarían ampliamente el sistema colaborando a la autonomía del robot.

El uso del internet se vuelve un limitante cuando la cobertura no es satisfactoria generando problemas de transmisión de datos e incluso pérdida de los mismos. Para trabajos futuros sería importante incluir una red inalámbrica independiente que permita estabilidad de transmisión de datos, así como una amplia cobertura. Colaboraría al manejo de información de forma más segura, evitando también fuga de datos con efectos positivos para la estación de control.

El diseño mecánico del proyecto se vio enfocado para ambientes controlados, para futuras investigaciones se podría modificar el diseño mecánico del proyecto, como por ejemplo el material de construcción y su locomoción, cambiando el tipo de movimiento y su suspensión, así como el uso de materiales no corrosivos y flexibles a entornos hostiles con el propósito de estabilizar la exploración autónoma.

El uso de tarjetas embebidas mejora la obtención y procesamiento de la información en tiempo real. El uso de dispositivos más avanzados y de mejores características no solo mejorará en la

validación de la información sino en el control robusto del sistema. Por la gran cantidad de dispositivos electrónicos que se manejan al tiempo, es importante que existan controladores que eviten fugaz de información y mantengan al sistema estable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, M., Bautista, M., & Iruegas, J. (2007). *Diseño y Control de Robots Móviles*. Nuevo Laredo, Tamaulipas, México: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.
- Arjonilla, G. (2011). *Desarrollo e implantación de plataforma robótica móvil en entorno distribuido*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Barrientos, V., García, J., & Silva, R. (2007). *Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte*. Distrito Federal, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Bermúdez, G. (2002). Robots Móviles, teoría, aplicaciones y experiencias. *TECNURA*, 5(1).
- Carrera Cepeda. (2018). Diseño y construcción de un robot móvil para SLAM con recuperación de ubicación en el caso de raptó. Sangolqui, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Espantoso, V. (2009). *Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral*. Madrid: Universidad carlos III de Madrid.
- González, A. (2016). *Algoritmo de localización y mapeo simultáneo con un robot móvil utilizando ROS y Gazebo*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- González, J., & Ollero, A. (2015). *Estimación de la Posición de un Robot Móvil*. Málaga, España: Universidad de Málaga.

- Lazea. (2001). *Aspects on path planning for mobile robots*. Cluj- Napoca, Romania: Technical University of Cluj- Napoca.
- López, L., & Bermúdez, G. (2013). *Localización de un robot móvil tipo lego con el filtro de Kalman*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- López, P. (2016). *Análisis de algoritmos para localización y mapeado simultáneo de objetos*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Magnabosco, L. (2012). *Control de movimiento de un robot móvil omnidireccional*. Catalunya, Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Martinez, S., & Sisto, R. (2009). *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Moya, C. (2017). *Sistema robótico móvil autónomo cooperativo para mapeo 2D de obstáculos y niveles de temperatura en un ambiente controlado*. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Ortega, J., & Yapo, L. (2017). *Construcción de un robot móvil híbrido omnidireccional*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Pastor. (25 de 04 de 2018). *Raspberry Pi 3 Model B+, análisis: más potencia y mejor WiFi para un miniPC que sigue asombrando*. Recuperado el 26 de 06 de 2018, de Xataka: <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-3-model-b-analisis-mas-potencia-y-mejor-wifi-para-un-minipc-que-sigue-asombrando>

- Pozo, A. (sep-dic de 2012). Modelo cinemático dinámico del mini robót móvil Ricimaf. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 33(3), 49-50.
- Quinaluisa Martínez , & Toapanta Campoverde . (2018). *Implementación de un sistema de navegación autónomo basado en SLAM y navegación reactiva*. Sangolqui, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Ramírez, P. (2016). *Modelado y simulación del robot omnidireccional de 4 ruedas suecas a 90 grados*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Rojas, R. (2005). *Omnidirectional Control*. Berlin, Alemania: Freie Universitat Berlin.
- Roy, R. (2015). *Manual de usuario ODROID-XU4*. Recuperado el 27 de 08 de 2018, de HARDKERNEL: <https://magazine.odroid.com/wp-content/uploads/odroid-xu4-user-manual-espanol.pdf>
- Saéñz, A., Santibañez, V., & Bugarin, E. (2016). *Control de velocidad de un robot omnidireccional con dinámica de actuadores*. La Laguna, México: Asociación Mexicana de Robótica e Industria.
- Salvatore, J. (22 de 07 de 2014). *Detección de objetos utilizando el sensor Kinect*. Recuperado el 26 de 06 de 2018, de 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology: <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP178.pdf>
- Sharbafi, M., Lucas, C., & Daneshvar, R. (2010). *Motion control of Omni-Directional Three-Wheel Robots by Brain-Emotional-Learning-Based Intelligent Controller*. New England: Cambridge.

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. Mexico: Mc Graw Hill Education.

Xie, L., Scheifele, C., Xu, W., & Stol, K. (2015). *Heavy-Duty Omni-Directional Mecanum-Wheeled Robot for Autonomous Navigation*. Auckland: University of Auckland.

Zambrano, V. (2015). *Implementación de algoritmos de determinación de rutas para el robotino de FESTO*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **Chuquitarco Mallitasig, Diego Xavier** y el señor **Quimbita Bedón, Stalin Santiago**.

En la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de mayo del 2019.

Ing. Darío Mendoza Ch.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Darío Mendoza Ch.

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO