



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA
ROBÓTICA MÓVIL PARA INTERIORES CAPAZ DE
REALIZAR SLAM (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND
MAPPING)**

**AUTORES: GALLARDO ANDRADE, JOSÉ ALEJANDRO
GAONA ROMÁN, ANDRÉS DAVID**

**DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR
CODIRECTOR: ING. PROAÑO ROSERO, VICTOR GONZALO**

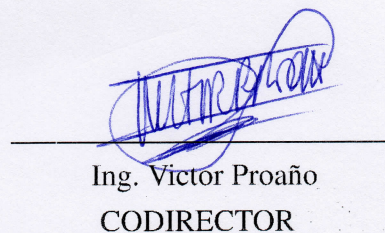
**SANGOLQUÍ
2015**

Certificado de elaboración del proyecto

Los suscritos, MSc. David Loza e Ing. Victor Proaño, director y codirector de proyecto de grado, respectivamente, certificamos que el proyecto de investigación titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)”, fue realizado en su totalidad por José Alejandro Gallardo Andrade y Andrés David Gaona Román, como requerimiento parcial para la obtención del título de ingeniero mecatrónico.



MSc. David Loza
DIRECTOR



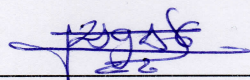
Ing. Victor Proaño
CODIRECTOR

Autoría de responsabilidad

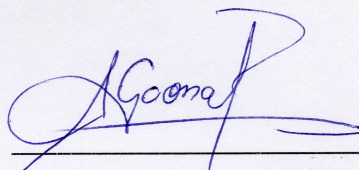
El proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)” ha sido desarrollado citando las fuentes correspondientes y respetando las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

En virtud de esta declaración, las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

ELABORADO POR:



José Alejandro
Gallardo Andrade

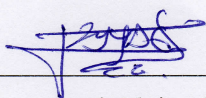


Andrés David
Gaona Román

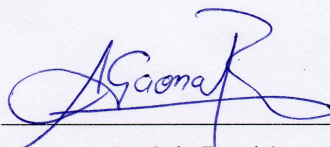
Autorización

Nosotros: José Alejandro Gallardo Andrade y Andrés David Gaona Román

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL PARA INTERIORES CAPAZ DE REALIZAR SLAM (SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING)", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



José Alejandro
Gallardo Andrade



Andrés David
Gaona Román

Dedicado a nuestras familias

José y Andrés

Agradecimientos

Existen muchas personas e instituciones quienes merecen reconocimiento por el trabajo realizado. Primero, agradecer a nuestros padres quienes han sabido ser soporte y guía en esta ardua tarea. A nuestras familias por ser refugio, amigo y un pilar fundamental en nuestras vidas.

También, queremos agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por permitirnos continuar con nuestra formación académica. Al grupo de docentes que ejercen en el laboratorio de procesos de manufactura por apoyarnos en las diferentes etapas del presente trabajo.

Deseamos agradecer a nuestros directores de tesis de grado MSc. David Loza e Ing. Victor Proaño por permitirnos ser parte del proyecto, su constante seguimiento y ayuda.

Gracias a todos los compañeros que aportaron con conocimiento a la concepción de este trabajo. A nuestros amigos con los cuales compartimos grandes experiencias en la etapa universitaria.

Estamos seguros que sin el aporte de todos y cada uno de ustedes, este proyecto no hubiese tenido un feliz término.

Muchas gracias a todos.

José y Andrés

Índice general

Certificado	II
Autoría de responsabilidad	III
Autorización	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Motivación y problemática	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación e importancia	6
1.4. Objetivos	7
1.5. Alcance	8
1.6. Estructura del documento	9
2. Estado del arte	10
2.1. Introducción a la robótica móvil	10
2.1.1. Historia de la robótica	10
2.1.1.1. Primeros desarrollos en robótica	11
2.1.1.2. Primeros desarrollos en robótica industrial	11
2.1.1.3. Primeros desarrollos en robótica móvil	12

2.1.2.	Clasificación de los robots	12
2.1.3.	Robótica móvil	13
2.1.4.	Clasificación de los robots móviles	14
2.1.5.	Clasificación de los robots móviles terrestres	15
2.1.6.	Mecanismos traslacionales de robots móviles	16
2.1.6.1.	Desplazamiento por rueda motora única	16
2.1.6.2.	Desplazamiento diferencial	17
2.1.6.3.	Desplazamiento por ruedas sincrónicas	18
2.1.6.4.	Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman	19
2.2.	Cinemática del robot móvil	20
2.2.1.	Desplazamiento diferencial	20
2.2.2.	Representación de posición del robot	21
2.2.3.	Modelo de cinemática directa	22
2.2.4.	Restricciones cinemáticas para ruedas	23
2.2.5.	Rueda fija estándar	23
2.2.6.	Rueda orientable estándar	24
2.2.7.	Rueda castor	25
2.2.8.	Limitaciones cinemáticas del robot	26
2.2.9.	Maniobrabilidad del robot móvil	27
2.2.10.	Grado de movilidad	28
2.3.	Percepción	29
2.3.1.	Sensores	30
2.3.2.	Sensores de un robot móvil	32
2.3.2.1.	Sonar	32
2.3.2.2.	Lidar	34
2.3.2.3.	Sistema de posicionamiento global	34
2.3.2.4.	Vídeo	35
2.3.2.5.	Kinect	35
2.4.	Localización de un robot móvil	36
2.4.1.	Formulación del problema del mapeo y localización simultáneos	37
2.4.2.	Filtro extendido de Kalman	38
2.4.2.1.	Componentes del filtro de Kalman	38
2.4.2.2.	Algoritmo del filtro de Kalman	40
2.4.2.3.	Aplicación del filtro extendido de Kalman a la robótica móvil	41
2.4.3.	Maximización de la expectativa	42
2.4.3.1.	Algoritmo de la maximización de la expectativa	42

2.4.3.2.	Aplicación de la maximización de la expectativa a la robótica móvil	43
2.4.4.	Filtro de partículas	43
2.4.4.1.	Componentes del filtro de partículas	43
2.4.4.2.	Algoritmo del filtro de partículas	44
2.4.4.3.	Aplicación del filtro de partículas a la robótica móvil	45
2.5.	Planeamiento y localización	45
2.5.1.	Definición operacional de SLAM	46
2.5.2.	Tipos de SLAM	47
2.5.2.1.	EFK SLAM	47
2.5.2.2.	FastSLAM 1.0	47
2.5.2.3.	FastSLAM 2.0	47
2.5.2.4.	L-SLAM	48
2.5.2.5.	GraphSLAM	48
2.5.2.6.	LSD-SLAM	48
2.6.	Resumen	48
3.	Metodología y diseño de la plataforma	50
3.1.	Definición de necesidades	50
3.2.	Definición de especificaciones	51
3.3.	Definición de la estructura funcional	52
3.4.	Definición de alternativas de diseño	52
3.4.1.	Módulo 1. Base	52
3.4.1.1.	Desplazamiento por rueda motora única	53
3.4.1.2.	Desplazamiento diferencial	53
3.4.1.3.	Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman	54
3.4.2.	Módulo 2. Tracción	54
3.4.2.1.	Motor con estator bobinado	54
3.4.2.2.	Motor paso a paso	55
3.4.2.3.	Servomotor	55
3.4.3.	Módulo 3. Potencia	56
3.4.3.1.	Puente H con componentes discretos	56
3.4.3.2.	Puente H circuito integrado	57
3.4.3.3.	Control con optoacopladores	58
3.4.4.	Módulo 4. Energético	59
3.4.4.1.	Celda solar	59
3.4.4.2.	Alternador	59
3.4.4.3.	Batería	60

3.4.5.	Módulo 5. Navegación reactiva	60
3.4.5.1.	Lidar	61
3.4.5.2.	Sonar	61
3.4.5.3.	Cámara de vídeo	62
3.4.6.	Módulo 6. Odometría	63
3.4.6.1.	Encoder y giroscopio	63
3.4.6.2.	Sensor de desplazamiento óptico	63
3.4.7.	Módulo 7. Adquisición y mando	64
3.4.7.1.	Raspberry	64
3.4.7.2.	Arduino	65
3.4.7.3.	BeagleBone	65
3.4.8.	Módulo 8. Visión	66
3.4.8.1.	Kinect	66
3.4.8.2.	Xtion	66
3.4.9.	Módulo 9. Control	67
3.4.9.1.	Matlab	67
3.4.9.2.	Sistema operativo robótico (ROS)	68
3.5.	Evaluación y selección de diseño	68
3.5.1.	Módulo 1. Base	69
3.5.2.	Módulo 2. Tracción	70
3.5.3.	Módulo 3. Potencia	71
3.5.4.	Módulo 4. Energético	72
3.5.5.	Módulo 5. Navegación reactiva	73
3.5.6.	Módulo 6. Odometría	75
3.5.7.	Módulo 7. Adquisición y mando	76
3.5.8.	Módulo 8. Visión	77
3.5.9.	Módulo 9. Control	78
3.6.	Definición del diseño	79
3.6.1.	Módulo 1. Base	79
3.6.2.	Módulo 2. Tracción	80
3.6.3.	Módulo 3. Potencia	83
3.6.4.	Módulo 4. Energético	85
3.6.5.	Módulo 5. Navegación reactiva	87
3.6.5.1.	Sensores ultrasónicos	87
3.6.5.2.	Sensores de fin de carrera	88
3.6.6.	Módulo 6. Odometría	88
3.6.6.1.	Encoder	89

3.6.6.2.	Giroscopio	89
3.6.7.	Módulo 7. Adquisición y mando	89
3.6.7.1.	Adquisición de datos	90
3.6.7.2.	Mando de actuadores	90
3.6.8.	Módulo 8. Visión	91
3.6.9.	Módulo 9. Control	91
3.6.9.1.	Estructura de control de la plataforma robótica móvil	91
3.6.9.2.	Nodo 1. Navegación reactiva	91
3.6.9.3.	Nodo 2. Operación remota	92
3.6.9.4.	Nodo 3. SLAM	92
3.6.9.5.	Nodo 4. Odometría	92
3.6.9.6.	Nodo 5. Visión	93
3.6.9.7.	Nodo 6. Control de motores	93
3.6.9.8.	Modelo cinemático de la plataforma robótica móvil	93
3.6.10.	Definición de concepto final	95
3.7.	Resumen	97
4.	Construcción y funcionamiento	98
4.1.	Construcción de la plataforma robótica móvil	98
4.1.1.	Manufactura del bastidor	98
4.1.2.	Instalación de componentes operativos	98
4.1.3.	Instalación de sensores	99
4.1.4.	Conexión de componentes	99
4.1.5.	Instalación de soportes	100
4.1.6.	Instalación de cámara Kinect	100
4.2.	Pruebas y funcionamiento	101
4.2.1.	Primera evaluación	101
4.2.1.1.	Resultados	101
4.2.2.	Segunda evaluación	102
4.2.2.1.	Resultados	102
4.2.3.	Tercera evaluación	103
4.2.3.1.	Resultados	103
4.2.4.	Cuarta evaluación	104
4.2.4.1.	Resultados	104
4.2.5.	Quinta evaluación	105
4.2.5.1.	Resultados	105
4.3.	Resumen	106

5. Conclusiones y trabajos futuros	107
5.1. Conclusiones	107
5.2. Recomendaciones y trabajos futuros	109
Bibliografía	111
A. Estructura en ROS del robot	116
A.1. Estructura en ROS	116
A.2. Estructura del robot en ROS	117
B. Planos de construcción del robot	119
B.1. Plano de ensamble	120
B.2. Vista explosionada	121
B.3. Base octagonal	122
B.4. Soporte fin de carrera	123
B.5. Parachoques	124
B.6. Contorno octagonal	125
B.7. Soporte baterías	126
B.8. Acople rueda motor	127
B.9. Soporte octagonal	128
B.10. Soporte cámara Kinect	129
B.11. Diagrama eléctrico/electrónico	130
C. Estructuras de programación del robot	131
C.1. Adquisición y mando	132
C.2. Adquisición de sensores ultrasónicos	133
C.3. Generación de pulsos	134
C.4. Comunicación serial	135
C.5. Navegación reactiva	138
C.6. Odometría	139
C.7. Localización y mapeo simultáneos	140

Índice de figuras

1.	Plataformas robóticas móviles	2
2.	Primeros prototipos de plataformas robóticas móviles. a) Elmer y b) Beast	4
3.	Primeras plataformas comerciales. a) Mowbot, b) RB5X y c) HERO	4
4.	Robots móviles desarrolladas por la NASA. a) Sojourner y b) Curiosity	5
5.	Plataformas robóticas móviles comerciales. a) Intellibot y b) KIVA	6
6.	Aplicaciones de robótica en otras áreas. a) Sistema quirúrgico Da Vinci y b) Prótesis mecatrónicas	7
7.	Plataforma robótica móvil TurtleBot	8
8.	Clasificación de los robots. a) Poliarticulado, b) Móvil, c) Androide, d) Zoomórfico y e) Híbrido	13
9.	Clasificación de los robots móviles terrestres. a) Con miembros articulados y b) Con estructura rodante	16
10.	Formas de desplazamiento por rueda motora única. a) Movimiento lineal, b) Movimiento curvilíneo y c) Movimiento rotatorio	17
11.	Formas de desplazamiento diferencial. a) Movimiento lineal, b) Movimiento curvilíneo, c) Movimiento rotatorio	18
12.	Distribución de ruedas sincrónicas	19
13.	Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman	19
14.	Desplazamiento diferencial. a) Ruedas motoras, b) Elemento seguidora y c) Plataforma del robot móvil	20
15.	Plano global y plano referencial del robot	21
16.	Plataforma móvil alineada con los ejes globales	22
17.	Rueda fija estándar y sus parámetros	24
18.	Rueda orientable estándar y sus parámetros	25
19.	Rueda de castor y sus parámetros	26
20.	a) Vehículo de dirección Ackerman de cuatro ruedas b) Bicicleta	28
21.	Mecanismo de percepción de un robot	30

22.	Sensores para robots. a) Sonar, b) Lidar y c) Cámara de vídeo	30
23.	Anillo de sensores ultrasónicos	33
24.	Cobertura vertical del anillo de sonares	33
25.	Sistema de visión artificial Kinect	36
26.	Localización y mapeo simultáneos	46
27.	Puente H transistorizado	56
28.	Puente H circuito integrado	57
29.	Control con optoacopladores	58
30.	Posicionamiento de las ruedas. a) motoras y b) seguidoras	80
31.	Cargas en reposo sobre una rueda motorizada	81
32.	Cargas presentes en el desplazamiento de una rueda motorizada	82
33.	Cargas presentes en el desplazamiento desde el reposo de una rueda motorizada	83
34.	Posición de sensores. a) Ultrasónicos y b) Fin de carrera	88
35.	Jerarquía de nodos en ROS	92
36.	Modelo CAD de la plataforma robótica móvil	96
37.	Modelo CAD de la plataforma robótica móvil. a) Módulo Base, b) Módulo de control y c) Módulo de visión Kinect	96
38.	Manufactura del bastidor	99
39.	Instalación de motores, controladores y baterías	99
40.	Instalación de sensores ultrasónicos y fin de carrera	99
41.	Conexión de componentes	100
42.	Instalación de soportes	100
43.	Instalación de cámara Kinect	101
44.	Corrección de la altura de ruedas seguidoras a) antes y b) después . . .	102
45.	Mapa generado	105
A.1.	Estructura del robot en ROS	118

Índice de tablas

1.	Detalle de Necesidades	51
2.	Detalle de especificaciones	51
3.	Módulos de la plataforma robótica móvil	52
4.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1	69
5.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 1	69
6.	Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1	69
7.	Ponderación de control para las alternativas de diseño al módulo 1	70
8.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 1	70
9.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 2	70
10.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 2	70
11.	Ponderación de implementación para las alternativas de diseño módulo 2	71
12.	Ponderación de control para las alternativas de diseño al módulo 2	71
13.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 2	71
14.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3	71
15.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 3	72
16.	Ponderación de funcionamiento para las alternativas de diseño módulo 3	72
17.	Ponderación de modularidad para las alternativas de diseño módulo 3	72
18.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 3	72
19.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4	72
20.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 4	73
21.	Ponderación de implementación para las alternativas de diseño módulo 4	73
22.	Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño al módulo 4	73
23.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 4	73
24.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 5	73
25.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 5	74
26.	Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 5	74
27.	Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 5	74
28.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 5	74

29.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 6	75
30.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 6	75
31.	Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 6 . .	75
32.	Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 6 . .	75
33.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 6	75
34.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 7	76
35.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 7	76
36.	Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 7	76
37.	Ponderación de programación para las alternativas de diseño al módulo 7 .	76
38.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 7	77
39.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 8	77
40.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 8	77
41.	Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 8	77
42.	Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 8 . .	77
43.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 8	78
44.	Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 9	78
45.	Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 9	78
46.	Ponderación de programación para las alternativas de diseño al módulo 9 .	78
47.	Ponderación de información para las alternativas de diseño al módulo 9 .	78
48.	Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 9	79
49.	Componentes seleccionados	79
50.	Características motor a pasos Wantai 57BYGH115-003B	84
51.	Características controlador de motor a pasos Wantai DQ542MA	84
52.	Tipos de baterías y características	86
53.	Características de la Batería Forza FUB-1270	87
54.	Características del sensor ultrasónico HC-SR04	87
55.	Características del sensor giroscopio MPU-6050	89
56.	Tabla comparativa de los principales sistemas embebidos Arduino . . .	90
57.	Detalle de sensores usados en el diseño de la plataforma robótica móvil .	90
58.	Nodos desarrollados en ROS	91
59.	Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil	96
60.	Datos de corriente y voltaje durante la segunda evaluación	103
61.	Datos de desviación en trayectoria abierta	103
62.	Datos de desviación en trayectoria cerrada	104
63.	Datos de localización en la quinta evaluación	106

Resumen

En el presente trabajo se diseña y construye un prototipo de robot móvil cuyo objetivo es incorporar un control que pueda darle autonomía en el desplazamiento. Así, se integra la localización y mapeo simultáneos a las funciones operativas de la plataforma robótica móvil. La primera parte del trabajo, la cual es tratada en los capítulos 1 y 2, habla sobre los conceptos básicos de robótica móvil. Involucra tópicos como cinemática del robot móvil y sistemas de percepción, También, se hace una introducción a la localización de un robot móvil y se describe los métodos matemáticos para solventar los problemas que pueden presentarse en este ámbito. Al concluir esta parte se detalla conceptos sobre la localización y mapeo simultáneos. La segunda parte, capítulo 3, se centra en el desarrollo de alternativas de diseño y su respectivo análisis para determinar la mejor opción a implementar. También, se habla sobre el control de la plataforma robótica, así como los nodos desarrollados en el sistema operativo robótico. Se detalla la estructura de los mismos, sus principales características, el modo de funcionamiento, así como la arquitectura implementada en el robot. En el capítulo 4 se expone la construcción del prototipo de la plataforma robótica móvil y se explica las evaluaciones realizadas a lo largo del proceso de implementación. El trabajo finaliza con conclusiones, así como las futuras líneas de investigación en las que puede aportar el desarrollo del presente proyecto.

PALABRAS CLAVES:

- **ROBOT MÓVIL**
- **SISTEMA OPERATIVO ROBÓTICO**
- **OPERACIÓN REMOTA**
- **ODOMETRÍA**
- **NAVEGACIÓN REACTIVA**
- **LOCALIZACIÓN Y MAPEO SIMULTÁNEOS**

Abstract

This work deals with the design and construction of a mobile robot prototype. The main goal is to incorporate a control to give autonomy to the movements of the robot. Simultaneous localization and mapping have been implemented to the mobile platform. The first part, which entails chapter 1 and 2, gives an explanation of the basic concepts that govern mobile robots. Additionally, mobile kinematics and perception systems are presented. Localization theory is introduced as well as a description of mathematical methods to solve problems about simultaneous localization and mapping. The second part, chapter 3, describes different design alternatives and its analysis in order to come up with the best option to be implemented. Furthermore, the implementation of robotic mobile platform control and nodes in the robotic operating system is shown. Chapter 4 deals with construction and assessment of the prototype throughout the process. Finally, conclusions and future research should be performed so that the robotic mobile platform can be improved.

KEYWORDS:

- **MOBILE ROBOT**
- **ROBOTIC OPERATING SYSTEM**
- **REMOTE OPERATION**
- **ODOMETRY**
- **REACTIVE NAVIGATION**
- **SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING**

Capítulo 1

Introducción

El primer capítulo nos presenta la necesidad de construcción de una plataforma robótica móvil. Se hace una breve revisión cronológica de los robots móviles. Se justifica el desarrollo del presente trabajo y se menciona la importancia del mismo. También, se definen los objetivos general y secundarios del trabajo. Se resalta el alcance que tendrá el proyecto. Algunos de los temas tratados aquí serán desarrollados en los próximos capítulos del trabajo escrito. Por último, se describe la estructura de la presente memoria.

1.1. Motivación y problemática

Una de las áreas de conocimiento que se ha desarrollado de manera acelerada en los últimos años ha sido la robótica [Siciliano & Khatib, 2008], impulsada principalmente por el desarrollo de componentes electrónicos de menor tamaño físico pero con mayores prestaciones que logran converger en un diseño mecánico. La finalidad es realizar un trabajo específico de forma automática basado en un algoritmo computacional. La robótica es la rama derivada de la ingeniería mecánica, eléctrica y computacional que abarcan el diseño, construcción, operación y aplicación de los robots [Oxford University, 2014], esto hace que la robótica sea una de las áreas más llamativas para realizar trabajos de investigación que aporten con nuevos conocimientos.

En la actualidad, la comunidad científica ecuatoriana, en especial los centros de educación superior, han sido exhortados a través de la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) a realizar trabajos investigativos con el objetivo de generar conocimiento, por ello la construcción de una plataforma robótica móvil será el punto de partida para realizar diversas investigaciones. Además, sirve como herramienta de enseñanza dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

La historia nos enseña que los primeros prototipos de robot móviles fueron elaborados en la década de 1950. Elmer y Elsie fueron dos robots autónomos denominados “*Machina Speculatrix*” [Holland, 2007] porque eran capaces de explorar el ambiente donde se desenvolvían. Ellos demostraron que un comportamiento complejo puede surgir de un simple diseño, lo que desencadenó una serie de innovaciones en todos los aspectos de un robot móvil. La percepción del entorno se convirtió en el reto más desafiante para los investigadores, a tal punto que hoy en día se han desarrollado sistemas de visión utilizando cámaras o sensores infrarrojos como la cámara Kinect [Ruiz et al., 2011]. De forma paralela se han creado técnicas de reconocimiento de ambientes que aprovechan el desarrollo de los sistemas de percepción para mejorar la autonomía de los robot móviles. Estas innovaciones han sido tan exitosas que han sido implementados en grandes proyectos como Sojourner, Opportunity y Curiosity desarrollados por la NASA para la exploración marciana. Uno de los último trabajos que tratan de darle un cambio generacional a los robots móviles es BigDog [Boston Dynamics, 2013], un autómatas para superficies irregulares con la capacidad de recuperar el equilibrio cuando ha sido desbalanceado por agentes externos como irregularidades en la superficie, golpes, entre otros.

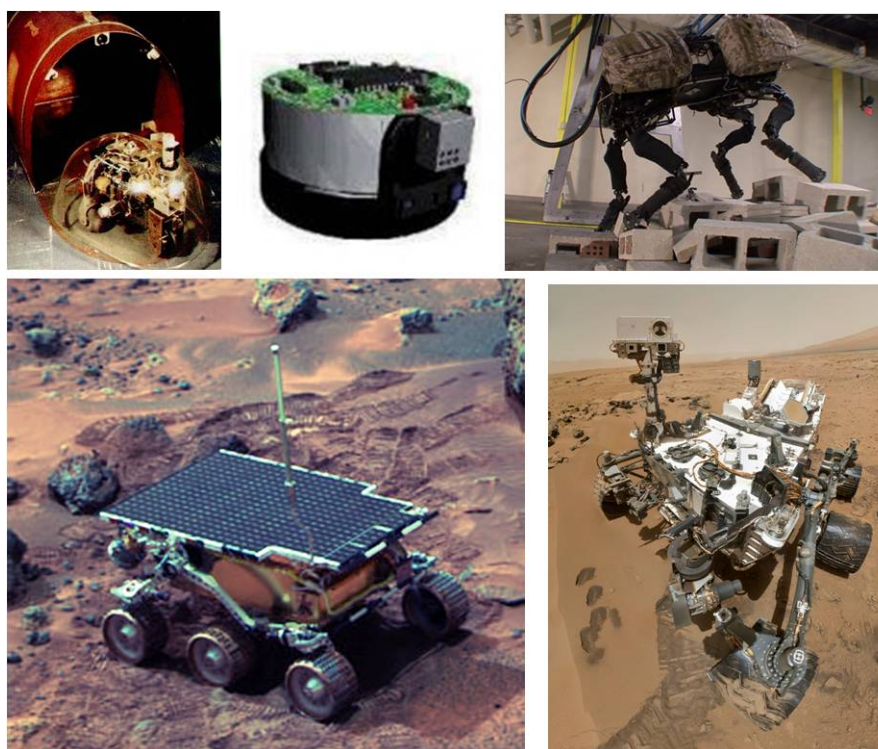


Figura 1: Plataformas robóticas móviles

Fuente: [Holland, 2007, Boston Dynamics, 2013, Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

A nivel nacional se han realizado diversos diseños e implementaciones de modelos robóticos. Por ejemplo, el trabajo de pregrado denominado uBot que consis-

tió en la construcción de un robot teledirigido capaz de reconocer el ambiente en el que se desenvuelve, logrando así una interacción con los elementos del entorno [Cardenas & Simbaña, 2007]. Otro trabajo destacable es el estudio de pregrado titulado “Mapas de entornos mediante navegación difusa” [Granda, 2012], que no ha sido implementado en un autómatas. La lista de trabajos sobre robótica en la que se han diseñado diferentes mecanismos para la movilización de los robots es extensa, sin embargo la gran mayoría de ellos están basados en teleoperación. La figura 1 nos muestra algunos ejemplos de plataformas robóticas móviles.

El autómatas propuesto para este trabajo tiene la singularidad de poder realizar mapeo y localización simultáneos. Este aspecto lo diferencia significativamente de otros trabajos realizados en el país, puesto que le daría autonomía en la capacidad de desplazamiento y reconocimiento del entorno en el que se desenvuelve. Así, esta plataforma robótica móvil se convertiría en un ejemplar pionero dentro de la robótica móvil, área de amplia investigación a nivel mundial pero limitada a nivel nacional.

1.2. Antecedentes

Si bien es cierto, los robots como herramientas de trabajo se encuentran a nivel industrial desde mediados del siglo XX comenzando por un robot denominado Unimate [Siciliano & Khatib, 2008] utilizado en la General Motors Company en las líneas de ensamblaje, no ha sido hasta la década de los 70 donde las necesidades de trabajo han requerido que los autómatas dejen de ser estaciones fijas y tengan la capacidad de moverse. Este cambio ha sido promovido principalmente por la necesidad de suplir a las personas en operaciones de alto riesgo, actividades como exploración en entornos radioactivos, en condiciones térmicas fuera de los rangos de tolerancia humana, ambientes volátiles, entre otros. Los robots móviles también son requeridos en áreas de producción y distribución dentro del campo industrial, siendo aquí donde se desea que el autómatas tenga la capacidad de trasladarse por cuenta propia, es decir, no son dependientes de algún operario, convirtiéndose así en un obrero más.

Los primeros resultados de autonomía en robótica móvil datan de la segunda guerra mundial, donde investigaciones de la milicia han permitido desarrollar misiles autodirigidos, valiéndose de las condiciones térmicas del objetivo a ser alcanzado por una arma de este tipo. Estos sistemas son los predecesores de los modernos misiles cruceros.

A finales de los 50, William Grey Walter construye Elmer y Elsie [Holland, 2007], dos robots capaces de explorar ambientes utilizando un sensor de luz. Estos robots eran capaces de guiarse por un destello luminoso y alcanzarlo evitando o moviendo obstácu-

los en el camino. Los resultados de Elmer y Elsie fueron motivación para innovaciones como las realizadas por la Universidad Johns Hopkins, quienes diseñan Beast, un robot móvil que usaba un sonar para la movilización, pues el haz de luz que Elmer y Elsie sensaban podía verse afectado por las condiciones luminosas del ambiente. Beast también tenía la capacidad de abastecerse de energía, lo que lo convierte en un trabajo notable desde el punto de vista de la autonomía robótica. Elmer y Beast son mostrados en la figura 2.

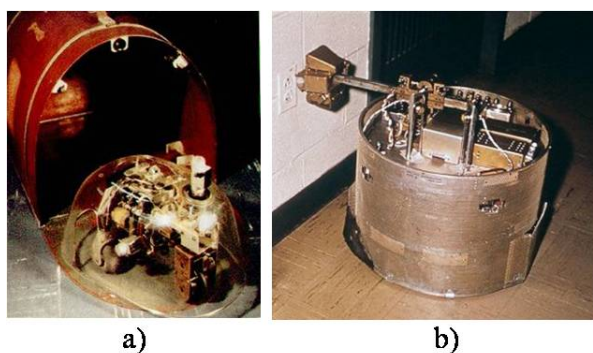


Figura 2: Primeros prototipos de plataformas robóticas móviles. a) Elmer y b) Beast
Fuente: [Holland, 2007]

El primer robot capaz de realizar un trabajo en su totalidad de forma autónoma fue Mowbot [Bellinger, 1971], desarrollado a inicio de la década de los 70 y cuya aplicación era la de podar el césped. Su sistema de control era limitado y poseía errores que perjudicaban su funcionamiento en la aplicación. A pesar de aquello, Mowbot fue el punto de partida para desarrollar plataformas móviles que ayuden en el hogar, así como de una serie de robots que tenían como propósitos el entretenimiento y la educación, entre los que se incluye el RB5X y el robot HERO [Bell, 1985]. La figura 3 nos presenta a estos tres ejemplo de robots.

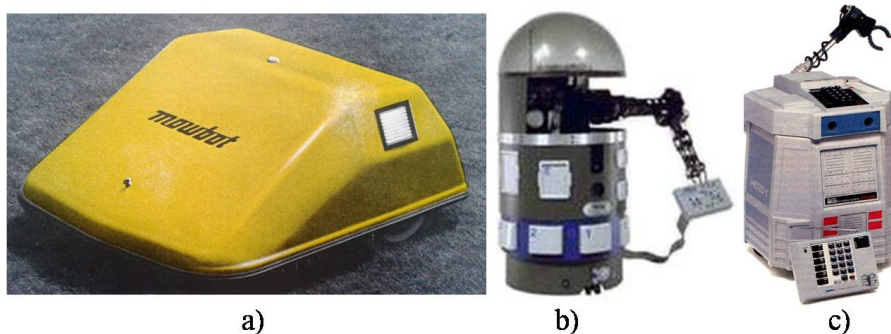


Figura 3: Primeras plataformas comerciales. a) Mowbot, b) RB5X y c) HERO
Fuente: [Holland, 2007]

En la década de los 90, Joseph Engelberger en un trabajo conjunto con colegas,

logran desarrollar el primer robot de movilidad autónoma para hospitales, su sistema de visión se basaba en una cámara capaz de detectar una línea blanca superpuesta en el piso de las instalaciones. Al mismo tiempo, otro grupo de investigadores desarrollan Khepera [Mondada et al., 1999], un autómatas con semejantes características pero con el objetivo de desarrollar nuevas técnicas de guiado para los robots móviles.

Más tarde, en 1995, la NASA desarrolla el Sojourner [Nelson, 2014b] cuyo objetivo era explorar la superficie marciana. En este robot se instalaron todos los sistemas conocidos hasta el momento de guiado automático con el propósito de encontrar caminos fáciles de transitar en la desconocida superficie. Aproximadamente dos décadas después sería reemplazado en su trabajo por el Curiosity [Nelson, 2014c], el mismo que ha sido denominado como el proyecto más vanguardista en el área de la robótica móvil autónoma. Los proyectos para la exploración marciana son mostrados en la figura 4.

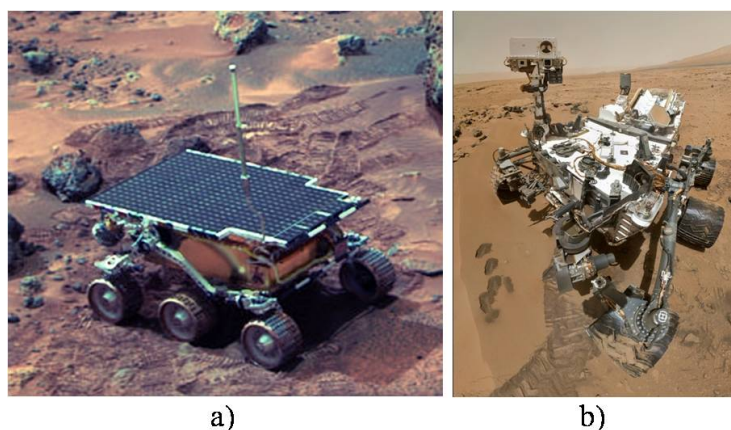


Figura 4: Robots móviles desarrolladas por la NASA. a) Sojourner y b) Curiosity
Fuente: [Nelson, 2014b, Nelson, 2014c]

Actualmente existen varias propuestas capaces de realizar diversos trabajos. Por ejemplo, Intellibot [Axon Robotics, 2014] una línea comercial de robots que restringen, limpian y barren pisos de hospitales, oficinas y otros edificios comerciales. Estos robots operan de forma autónoma, mapeando el ambiente y usando un arreglo de sensores para evitar obstáculos. Otro proyecto interesante es Kiva Systems [D'Andrea, 2012], un grupo de robots inteligentes que proliferan en operaciones de distribución, su inteligencia distribuida les ayuda a ordenar productos de acuerdo a la popularidad de cada uno de ellos de forma automática. Intellibot y KIVA son presentados en la figura 5.

Estas propuestas integran en su desarrollo, sistemas de movilización y de visión que al converger permiten a los autómatas realizar diversas actividades y al mismo tiempo relacionarse con el entorno en el que se desenvuelven.



Figura 5: Plataformas robóticas móviles comerciales. a) Intellibot y b) KIVA

Fuente: [Holland, 2007]

1.3. Justificación e importancia

La robótica a nivel mundial se encuentra en auge desde hace más de dos décadas, debido a los beneficios que dan a la sociedad en tareas de alto rigor como fundición de metales, levantamiento de cargamentos pesados, precisión y repetitibilidad en las líneas de ensamblaje, entre otros. También, son de gran ayuda en tareas de alto riesgo para el ser humano como exploración de centrales nucleares donde existen altos niveles de radiación, exploración de estructuras en ruinas debido a su gran capacidad de movilidad, incluso en tareas como el desarme de bombas evitando así afectaciones humanas. En otras palabras, los autómatas se están convirtiendo en elementos de apoyo para múltiples actividades.

Es importante mencionar que existen varias áreas de la robótica que han tomado un papel importante en la investigación y el desarrollo. Es el caso de la medicina, donde se ha diseñado el sistema quirúrgico Da Vinci [Taylor, 2006], un robot capaz de realizar cirugías teledirigidas. También, se ha logrado desarrollar prótesis mecatrónicas para personas con capacidades diferentes, es decir, existen personas que por diversos motivos, han fusionado su cuerpo con un dispositivo robótico con la finalidad de poder hacer la convivencia más sencilla. La figura 6 nos ilustra sobre las aplicaciones mencionadas.

No obstante, todos los ejemplos nombrados anteriormente son aplicaciones de robótica en las que deben ser comandados por un operario humano, es decir, no tienen la habilidad de realizar actividades por cuenta propia. Esta necesidad da apertura a un campo de investigación muy extenso que pretende darles a los robots el sentido de autonomía, al menos para realizar actividades básicas como el transporte de material sin supervisión en una línea de manufactura, exploración de entornos no aptos para el ser humano sin la necesidad de un operario, entre otros.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE a través de este proyecto, se ha planteado diseñar y construir una plataforma robótica móvil capaz de trasladarse de



Figura 6: Aplicaciones de robótica en otras áreas. a) Sistema quirúrgico Da Vinci y b) Prótesis mecatrónicas

Fuente: [Taylor, 2006, Barnes & Jentsch, 2010]

forma autónoma. Esto permitirá realizar diferentes trabajos investigativos en el área de robótica móvil con el objetivo de beneficiar a la comunidad científica ecuatoriana. Por este motivo, el proyecto busca vincular las tecnologías de hardware y software de código abierto, lo que permitirá realizar modificaciones de forma sencilla.

Una de las herramientas que se convierte en un aporte del proyecto es el sistema operativo robótico. ROS, por sus siglas en inglés, es una aplicación que aglomera librerías, convenciones y herramientas que tienen como finalidad simplificar la tarea de crear un comportamiento complejo y robusto. Este utilitario puede ser aplicado en una amplia variedad de plataformas robóticas y es de código abierto.

1.4. Objetivos

El objetivo principal es **diseñar y construir una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar mapeo y localización simultáneos**. Es importante mencionar que el objetivo principal planteado es extenso por lo que se ha subdividido en diferentes objetivos secundarios:

- Diseñar y construir la estructura de la plataforma robótica móvil.
- Implementar el control de la plataforma robótica móvil utilizando el sistema operativo robótico (ROS)
- Configurar la plataforma robótica móvil para realizar localización y mapeo simultáneos.
- Evaluar el funcionamiento de la plataforma robótica móvil.

Como complemento a los objetivos anteriores, se han propuesto objetivos secundarios adicionales:

- Revisar el estado del arte sobre robots móviles enfocando las características funcionales, electrónicas y mecánicas que debe cumplir la plataforma.
- Redactar un artículo científico sobre el trabajo realizado

1.5. Alcance

Actualmente existen un extenso número de robots capaces de realizar mapeo y localización simultáneos, uno de ellos es TurtleBot desarrollado por Open Source Robotics Foundation [Open Source Robotics Foundation, 2014], que ha tenido una gran aceptación mundial debido a su alto nivel de integración, así como por el desarrollo sobre software y hardware de código abierto. Una de las presentaciones clásicas de esta plataforma es presentada en la figura 7.



Figura 7: Plataforma robótica móvil TurtleBot
Fuente: [Open Source Robotics Foundation, 2014]

El proyecto a desarrollarse tendrá muchas características semejantes a TurtleBot. Con esto se pretende alcanzar dos tareas específicas:

- Mapeo de un entorno de superficie lisa, asistido por un sistema de visión desarrollado con cámara Kinect.
- Navegar dentro del entorno mapeado de forma autónoma de acuerdo a los requerimientos establecidos por el usuario.

1.6. Estructura del documento

El documento se estructura en cuatro capítulos. El primer capítulo nos hace partícipes de las generalidades y marco legal del proyecto, define los objetivos y el alcance planteados para el mismo. El segundo capítulo nos da una visión general de la robótica móvil así como la clasificación de los autómatas de este tipo. También, se realiza el estudio matemático para la movilidad de un robot, se analiza mecanismos de percepción y visión. Finalmente, se analizan las simplificaciones realizadas en el trabajo propuesto.

En el tercer capítulo se aborda el diseño mecánico del robot, la integración con los dispositivos eléctricos, electrónicos y de potencia, así como la arquitectura de control utilizada para su respectivo funcionamiento. Se describe los módulos necesarios del sistema de movimiento, mapeo y localización, sus fundamentos y principales características.

En el capítulo cuatro se habla de la evaluación realizada al prototipo, las pruebas, niveles de desempeño alcanzado y los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo cinco, se presentan las conclusiones y recomendaciones durante el desarrollo del del trabajo. Además, se indican las futuras líneas de investigación y desarrollo.

Capítulo 2

Estado del arte

El capítulo presenta conceptos generales sobre robótica, así como clasificaciones de los robots desde diversos enfoques. Analiza los mecanismos traslacionales y detalla el modelo cinemático del robot móvil propuesto para este proyecto. También, incluye detalle sobre los diferentes sensores utilizados en técnicas de percepción. Presenta el problema de la localización y mapeo simultáneos, así como algunas de las soluciones a mencionado conflicto. Por último, se describe algunos tipos de algoritmos para localización y mapeo simultáneos.

2.1. Introducción a la robótica móvil

2.1.1. Historia de la robótica

La historia de la robótica se puede clasificar en cinco generaciones: las dos primeras, alcanzadas en los ochenta, incluían la gestión de tareas repetitivas con autonomía muy limitada. La tercera generación incluiría visión artificial, en lo cual se avanzó mucho en los ochenta y noventa. La cuarta incluye movilidad avanzada en exteriores e interiores y la quinta entraría en el dominio de la inteligencia artificial en lo cual se esta trabajando actualmente.

A lo largo de la historia, se ha concebido la idea de tener una herramienta capaz de realizar un trabajo de forma autónoma al punto de encontrarse dentro de la mitología y la religión de las principales civilizaciones del mundo. Existen varios ejemplos que muestran la presencia de artefactos autómatas dentro de estas áreas de conocimiento. Por ejemplo los sirvientes mecánicos construidos por el dios griego Hephaestus. Los gigantes de arcilla como Galatea, la mítica estatua de Pygmalion que adquirió vida según una leyenda judía. La idea de Talos, el guardia de bronce que resguardaba la isla de Creta de los ataques piratas [Rosheim, 1994]. Todas estas ideas están basadas en el

concepto de crear mecanismos con forma humana capaces de suplir alguna necesidad.

2.1.1.1. Primeros desarrollos en robótica

Los conceptos de robótica no solo fueron producto de ideas míticas o religiosas, también fueron llevadas a la práctica por los primeros ingenieros de la historia quienes contribuyeron con algunas concepciones para realizar trabajos que en aquel tiempo ya requerían ser automáticos. Es el caso de trabajo del ingeniero griego Ctesibius (270 a.C.) que aplicó conocimientos básicos de neumática e hidráulica para producir el primer reloj de agua con movimiento de figuras [BBC Corp, 2014]. Otro trabajo interesante en la antigüedad fue el que realizó el matemático griego Arquitas de Tarento (70 a.C.) quien construyó un ave mecánica que funcionaba con vapor denominado “La Paloma” [Rosheim, 1994]. Estos son claros ejemplos que fortalecen el hecho de que la existencia de máquinas autómatas siempre ha estado adyacente a la inventiva del ser humano.

Existe un trabajo que debe ser nombrado, pues debido a la complejidad de lo realizado en concordancia de la época se considera como en inicio de la robótica [Fowler, 2008]. Este artefacto fue realizado por Su Song (725 d.C), un reconocido ingeniero chino perteneciente a la dinastía Song , quien construyó una torre reloj astronómica capaz de ser programada para entonar diferentes melodías de acuerdo a la hora mostrada. A partir de esto se ha desarrollado una extensa lista de artefactos autómatas destinados a beneficiar a los usuarios en múltiples aplicaciones. Por ejemplo, sistemas de riego automático que eran calibrados de acuerdo a la temporada y la hora del día [Kurfess, 2005]. También, menciona juguetes musicales que podían ser programados para entonar varias melodías. Existen varios trabajos de Leonardo Da Vinci (finales del siglo XV) que presentan dibujos sobre robots humanoides [Taddri, 2007].

2.1.1.2. Primeros desarrollos en robótica industrial

Más adelante en la línea cronológica, por el año de 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica capaz de realizar dibujos. Para conseguir este fin se utilizó un sistema de levas. El mismo mecanismo permitió desarrollar muchas invenciones en la revolución industrial (mediados del siglo XVIII) orientadas a la producción textil. El telar mecánico de Cartwright, así como de Jacquard pueden ser mencionados como puntos sobresalientes de este proceder tecnológico [Woodcroft, 1863].

A pesar de ser tan comunes dentro de la historia, no se generó un nombre para denominarlos de forma general, hasta que el dramaturgo checo Karel Capek utilizó la palabra “Robot” en la obra “*Rossum’s Universal Robots*” [Capek et al., 1920] publicada en 1921. La palabra tiene su origen en el idioma checo y significa “trabajo

duro”.

Años más tarde, en 1961 un robot denominado Unimate [Siciliano & Khatib, 2008] se instaló en la Ford Motors Company para atender una máquina de fundición de troquel. Este fue el inicio de la robótica conocida en la actualidad. En 1966, Trallfa, una firma noruega, construyó e instaló un brazo robótico para realizar el proceso de pintura por pulverización. En 1971, se desarrolló en la Universidad de Stanford un pequeño brazo de robot de accionamiento eléctrico. En 1978, se introdujo el robot PUMA [Siciliano & Khatib, 2008] para tareas de montaje, basándose en diseños obtenidos en un estudio de la General Motor Company. A partir de estos robots, las aplicaciones de la robótica a nivel industrial se han multiplicado al punto de tener procesos productivos totalmente automatizados.

2.1.1.3. Primeros desarrollos en robótica móvil

La sección 1.2 de esta memoria presenta los primeros indicios de robótica, así como el desarrollo de los robots móviles. No obstante, dentro de la historia de esta rama de la ciencia, es importante mencionar que el concepto principal fue evolucionado hacia los sistemas móviles autónomos, los mismos que son capaces de desenvolverse por sí mismos en entornos desconocidos y parcialmente cambiantes sin necesidad de un supervisor. En la década de 1970, la NASA inicio un programa para desarrollar plataformas capaces de explorar terrenos hostiles. Producto de esta inversión investigativa resulta los famosos Sojourner [Nelson, 2014b] y Luna Rover [Nelson, 2014a].

2.1.2. Clasificación de los robots

Clasificar a los robots es una tarea complicada pues dependen de las características y variantes que presentan los diferentes autómatas [Kurfess, 2005]. Varias clasificaciones han sido desarrolladas a lo largo de los años. La más importante para el desarrollo de este trabajo es la que clasifica a los robots por su estructura. Así tenemos:

- **Poliarticulados:** Robots estáticos capaces de mover sus elementos articulados en un área de trabajo determinada. Ejemplos claros de este tipo son los cartesianos, manipuladores, entre otros.
- **Móviles:** Capaces de realizar un desplazamiento debido a que su estructura principal es un carro o plataforma móvil. Son guiados por teleoperación o por algoritmos de programación que ayudan a reconocer el ambiente en el que se desenvuelven. TurtleBot [Open Source Robotics Foundation, 2014] y Curiosity Mars Rover [Nelson, 2014c] son ejemplos de este tipo de robots.

- Androides: Son robots que pretenden reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. Ejemplos conocidos de este tipo de autómatas son Asimo [Sakagami et al., 2002] desarrollado por Honda o los Toyota Partner Robots [Takagi, 2006].
- Zoomórficos: Son robots cuya estructura física reproducen la forma de algún ser vivo. BigDog [Boston Dynamics, 2013] es un ejemplo de esta categoría.
- Híbridos: Donde se aglomeran los robots que son difíciles de clasificar en las anteriores categorías y en su estructura poseen variantes de las mismas.

En la figura 8 se muestran ejemplos de los diferentes tipos de robots desarrollados con diversos propósitos.

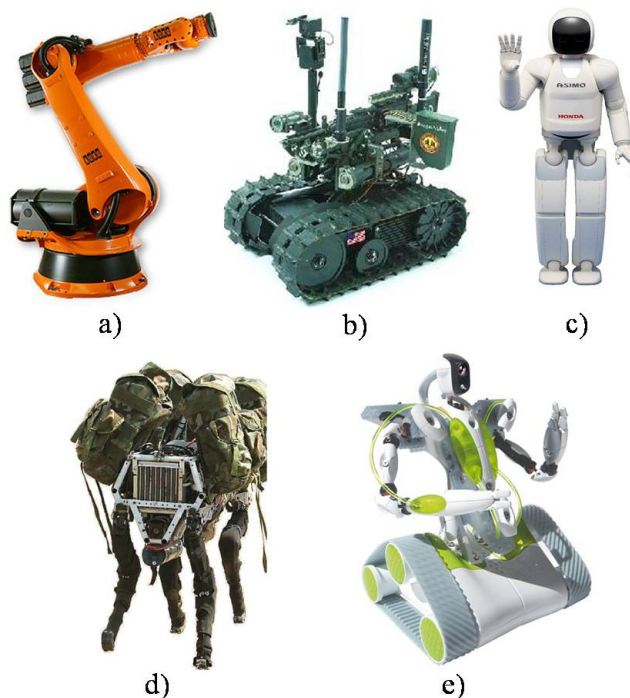


Figura 8: Clasificación de los robots. a) Poliarticulado, b) Móvil, c) Androide, d) Zoomórfico y e) Híbrido

Fuente: [Diaz & Dutra, 2013, Barnes & Jentsch, 2010, Sakagami et al., 2002, Boston Dynamics, 2013]

2.1.3. Robótica móvil

Dentro de la clasificación desarrollada en la sección 2.1.2 consta un tipo de robot cuyo análisis es importante para el desarrollo de este trabajo. Los robots móviles se

convierten en una de las herramientas de trabajo e investigación más comunes dentro de la comunidad científica, debido a la versatilidad presentada en diversas aplicaciones. Además, se considera que este tipo de autómatas están dotados de un nivel relativamente alto de inteligencia artificial [Jones et al., 2010].

Un robot móvil se define como “una máquina automática que posee la capacidad de movimiento dentro de un ambiente propio” [Bräunl, 1998]. Sin embargo, la definición dada no abarca en su totalidad el concepto que define a un autómata de este tipo, pues se debe mencionar aspectos como cinemática, percepción, localización en un ambiente, entre otros. Por tal motivo, un robot móvil no debe ser considerado como un autómata capaz de desplazarse en un ambiente, está es la más importante de las características de este tipo de robot, pero no la única. Un robot móvil debe poseer además la habilidad de navegar en el espacio establecido evitando situaciones de colisión con objetos estáticos o móviles. Además, debe evitar condiciones de temperatura, radiación, humedad, entre otras, que dependen de las aplicaciones [Fahimi, 2009].

Los robots móviles se convierten en una de las herramientas más versátiles dentro de la industria. Las aplicaciones de este tipo de autómatas pueden ser tan variadas como se requieran en los procesos. Pueden servir de transporte de partes entre estaciones de trabajo en procesos no secuenciales, procesos de traslado a grandes distancias de material pesado guiados por trayectorias definidas en la distribución de la planta industrial, posicionamiento de artículos en una estación definida, entre otras.

Es importante mencionar que en la actualidad, los robots móviles son usados para el monitoreo e inspección de ambientes donde la presencia humana afectaría las condiciones normales de operación, tales como ambientes de temperatura o humedad específica. También, se disponen en lugares donde las condiciones pueden ser nocivas para el operario humano, por ejemplo estaciones radioactivas o de gases nocivos. Su versatilidad de control y movimiento también los hace óptimos para realizar revisiones en sitios remotos de edificios o plantas industriales. Además, ayudan en la detección de intrusos y generación de alarmas cuando se les añade circuitos de televisión cerrados.

2.1.4. Clasificación de los robots móviles

Los robots móviles se han clasificado de acuerdo al medio en el que se desenvuelven [Kurfess, 2005]. Entonces tenemos:

- **Aéreos:** Son un tipo de robot semejante a aviones o helicópteros pero con la diferencia de no tener tripulación. Así, se reduce el tamaño, los costos de fabricación y multiplica las aplicaciones. Comúnmente se han denominado drones y muchos de ellos se utilizan en tareas de vigilancia, policía, bombero, inspección,

reparto, mapeo, entre otras. Existen una gran variedad de ejemplares de este tipo de robots móviles pero se puede destacar Camclone T21 [Li et al., 1994] un cuadróptero cuya principal aplicación es la inspección de líneas de alta potencia, así como Aerovision Fulmar [Li et al., 1994] un aeroplano capaz de realizar inspección en campos selváticos extensos. También, ayuda en tareas de fumigación de plantaciones de los principales componentes de sustancias estupefacientes.

- Acuáticos: Como su nombre lo dice son aplicaciones robóticas capaces de desplazarse sobre o bajo el agua sin la necesidad de ser tripulado. Las aplicaciones para este tipo de robot son extensas al punto que abarcan desde la exploración de vida acuática hasta aplicaciones militares. Un ejemplar de destacar es Bluefin-12 [Willcox et al., 2007] cuya función es ayudar al control del tráfico de drogas. Su diseño lo hace único en su clase ya que es capaz de funcionar con luz solar.
- Terrestres: Son autómatas que se desplazan sobre tierra. Este tipo de autómata es muy común en múltiples aplicaciones. También, son foco de investigación a nivel mundial. Al igual que las categorías anteriores, estos robots funcionan sin necesidad de ser tripulados. En esta categoría se puede destacar los Toyota Partner Robots [Takagi, 2006].

Un punto importante a mencionar es que el modo de operación de los robots citados en la clasificación puede ser por telemetría o por mecanismos automáticos de control.

2.1.5. Clasificación de los robots móviles terrestres

Antes de proceder al desarrollo de la cinemática de un robot móvil, es importante realizar una clasificación de los mismos de acuerdo al tipo de mecanismo usado para el desplazamiento espacial [Kurfess, 2005]. En esta clasificación constan los siguientes tipos:

- Con miembros articulados: Son un tipo de robot móvil cuya característica principal es el hecho de poseer elementos que se asemejan a las patas de los insectos. La mayoría de este tipo de robots poseen 4 o 6 extremidades que permiten el desplazamiento entre lugares. Una ventaja de estos diseños son la estabilidad y la capacidad de movilizarse en ambientes donde las ruedas no poseen una gran efectividad. Dentro de este grupo podemos mencionar al robot QRIO [Geppert, 2004] diseñado por Sony y a ASIMO [Sakagami et al., 2002] desarrollado por Honda.
- Con estructura rodante: Este tipo de robot se caracteriza por poseer un mecanismo de desplazamiento compuesto por ruedas o cadenas de oruga, dependiendo

del tipo de aplicación. Es conocido que el último elemento nombrado es utilizado para desplazamientos sobre terrenos no uniformes, mientras que los robots con ruedas son aplicados en fábricas, escuelas, salas de recepción, entre otros. Esta categoría también implica una variedad de autómatas de los cuales podemos destacar el robot Gladiator [Barnes & Jentsch, 2010] que cumple tareas militares. También, TurtleBot [Open Source Robotics Foundation, 2014] que ha sido diseñado para trabajar en interiores y puede ser utilizado en varias aplicaciones.

La figura 9a nos muestra un ejemplo de robot con miembros articulados, mientras que la figura 9b con estructura rodante.

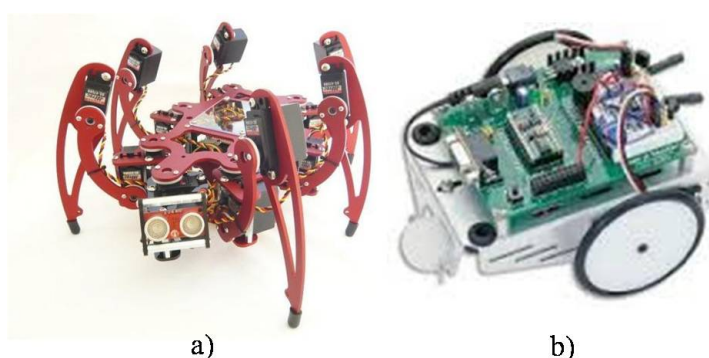


Figura 9: Clasificación de los robots móviles terrestres. a) Con miembros articulados y b) Con estructura rodante

Fuente: [Jones et al., 2010]

2.1.6. Mecanismos traslacionales de robots móviles

La forma más sencilla de construir una plataforma móvil requiere únicamente de dos motores. Sin embargo, estos actuadores pueden ser distribuidos de forma que generen distintos mecanismos de movimiento, cada uno con sus correspondientes ventajas y desventajas.

2.1.6.1. Desplazamiento por rueda motora única

Este concepto, quizás es el diseño más sencillo e implica tener una rueda que haga las veces de directriz y motriz del robot móvil. Además, requiere de dos elementos adicionales rodantes pues la plataforma robótica móvil debe tener contacto en tres puntos con la superficie de desplazamiento. Las principales ventajas de este diseño es que los motores a utilizar no requieren tener las mismas características operativas como voltaje y corriente. Además, los controles son independientes entre si.

En este modelo tiene la particularidad de realizar movimientos lineares como cualquier otro concepto de diseño (figura 10a), sin embargo, los movimientos curvilíneos

están regidos por la posición angular que posea la rueda principal respecto de los otros dos componentes rodantes (figura 10b). De esta manera, tenemos que los arcos de desplazamiento a realizar son función del ángulo de la rueda directriz teniendo como límite las posición de 90° en la que el radio de giro es mínimo y el robot girará alrededor del punto intermedio de las dos ruedas traseras (figura 10c).

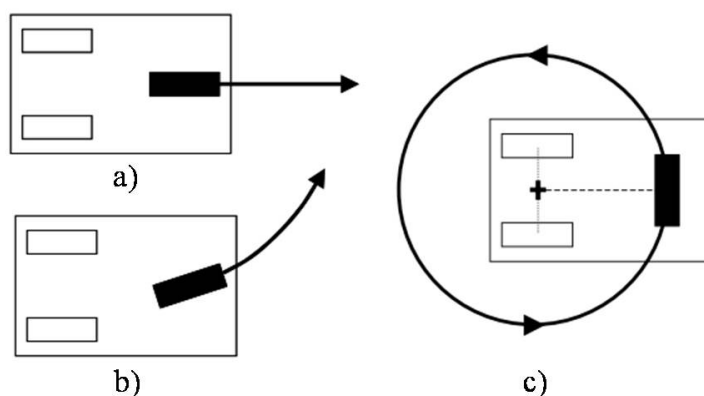


Figura 10: Formas de desplazamiento por rueda motora única. a) Movimiento lineal, b) Movimiento curvilíneo y c) Movimiento rotatorio

Fuente: [Bräunl, 1998]

2.1.6.2. Desplazamiento diferencial

El diseño diferencial posee dos ruedas motoras posicionadas paralelamente al lado derecho e izquierdo del robot y apoyadas por uno o dos elementos adicionales rodantes que ayudan en la estabilidad de la plataforma robótica móvil. Este concepto funciona de una manera óptima cuando los motores poseen características operativas semejantes y es mecánicamente más simple que el modelo de simple rueda motora porque no requiere rotación de dicho componente. Sin embargo, el control para realizar los movimientos de rotación y traslación curvilínea son más complejos puesto que requieren la coordinación de las dos ruedas motoras.

A diferencia del modelo de simple rueda donde se debe tener necesariamente dos elementos de apoyo, el desplazamiento diferencial puede funcionar con un solo soporte adicional, el mismo que no puede ser posicionado en la mitad del robot por cuestiones de estabilidad. Este hecho genera una desventaja notable respecto del diseño anterior, pues no puede girar sobre un punto fijo. Este problema se corrige al añadir un segundo elemento rodante pasivo en el lado opuesto al que se colocó el primer elemento, dejando en la mitad a las dos ruedas motoras. El diseño permite al robot realizar trazados lineales cuando las ruedas motores tienen la misma velocidad de rotación y la misma dirección (figura 11a), movimientos curvilíneos cuando las ruedas motoras tienen

diferente velocidad y la misma dirección (figura 11b), movimientos rotatorios sobre un punto cuando los motores tienen la misma velocidad pero direcciones contrarias (figura 11c).

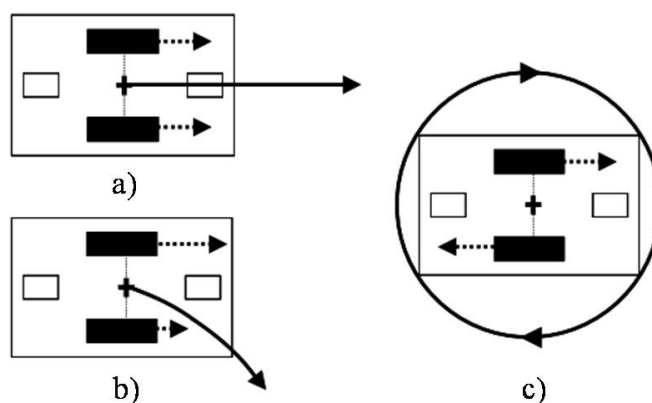


Figura 11: Formas de desplazamiento diferencial. a) Movimiento lineal, b) Movimiento curvilíneo, c) Movimiento rotatorio

Fuente: [Bräunl, 1998]

Una variante de los robots móviles con desplazamiento diferencial son los robots oruga, denominados así por poseer cadenas metálicas en lugar de ruedas motoras, las mismas que ayudan a mejorar el desplazamiento sobre superficies rugosas debido a que estas cadenas generan múltiples puntos de contacto con las superficies.

2.1.6.3. Desplazamiento por ruedas sincrónicas

El diseño de un robot de desplazamiento sincrónico es una modificación del modelo de rueda motora única. La diferencia consta en que este modelo tiene tres ruedas motoras que actúan en sincronía, es decir, las tres ruedas son conductoras, tienen la capacidad de girar sobre su propio eje y siempre lo hacen de forma que se posicionan en la misma dirección. La figura 12 nos muestra la distribución de ruedas sincrónicas. Además, es notoria la necesidad de instalar al menos tres ruedas que sirven como puntos de apoyo entre el robot y la superficie de trabajo con el objetivo de que el autómatas posea estabilidad estática.

Una desventaja de este tipo de robots es que solo posee dos grados de libertad, puesto que para trazar un recorrido curvilíneo, el robot debe parar su desplazamiento recto, alinear sus ruedas y continuar en el desplazamiento recto, es decir, no puede desplazarse y rotar al mismo tiempo. Sin embargo, esta condición le da una característica única ya que permite realizar una cobertura total del área de trabajo, debido a que puede realizar desplazamientos más pequeños en varias direcciones.

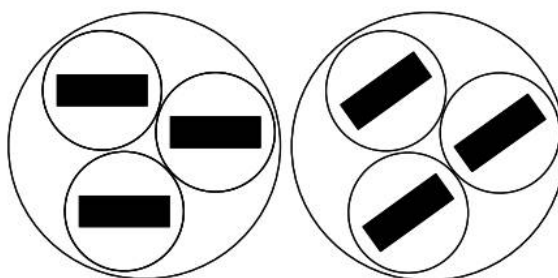


Figura 12: Distribución de ruedas sincrónicas
Fuente: [Bräunl, 1998]

2.1.6.4. Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman

Este tipo de diseño para plataforma robótica móvil combina la tracción y direccionamiento de un automóvil común. Se utiliza un motor en conjunto con un mecanismo que distribuye la energía traslacional hacia las ruedas traseras del robot móvil. Otro motor, mediante un sistema de distribución, ayuda a rotar las ruedas delanteras para realizar los movimientos curvilíneos deseados. La figura 13 nos muestra la configuración típica del mecanismo de Ackerman.

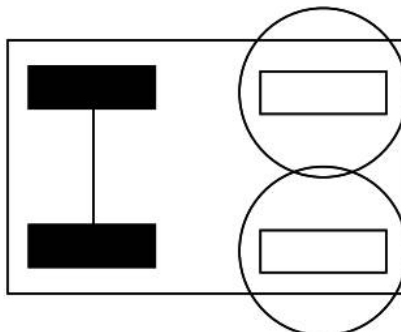


Figura 13: Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman
Fuente: [Bräunl, 1998]

Este tipo de diseños tiene un gran número de ventajas sobre los otros modelos. Por ejemplo, la capacidad de moverse frontalmente sin problema alguno, pues su tracción está fijada en la parte posterior. Además, al poseer motores que realizan operaciones independientes se pueden diseñar control por separado. Sin embargo, existen desventajas que en robótica móvil son importantes mencionar tales como la incapacidad de realizar giros sobre un punto, así como la desalineación de las ruedas traseras cuando se realizan trazados curvilíneos.

2.2. Cinemática del robot móvil

La cinemática es el estudio básico de movimientos de un sistema mecánico. En robótica móvil es necesario entender el comportamiento del robot para obtener un diseño y un control apropiado del mismo [Siegwart et al., 2011]. Para comprender el movimiento de un robot se debe describir la contribución de las ruedas del robot en el movimiento. Cada rueda impone limitaciones del movimiento al robot que deben ser tomadas en cuenta para el funcionamiento del autómata. También, dependerá de la seguridad del entorno y del mismo robot, por lo cual el estudio de la cinemática de las ruedas del robot permitirá encontrar sus limitaciones y ayudar con el desplazamiento del robot en el entorno.

Un robot móvil se puede desplazar por el entorno de diferentes formas, una más compleja que otra. Por ejemplo, el desplazamiento omnidireccional que permite al robot moverse en cualquier dirección y en cualquier momento sin requerir una orientación específica para el desplazamiento del robot. Otro caso y uno de los más utilizados por su facilidad y economía, comparado con sus contrapartes de rueda única o mecanismo de Ackerman, es el desplazamiento diferencial. Este mecanismo consiste en un arreglo de dos ruedas que cambian su dirección y velocidad para poder generar el movimiento.

2.2.1. Desplazamiento diferencial

El diseño diferencial posee dos ruedas motoras posicionadas paralelamente al lado derecho e izquierdo del robot y apoyadas por uno o dos elementos adicionales rodantes que ayudan en la estabilidad de la plataforma móvil. Este concepto funciona de una manera óptima cuando los motores poseen características operativas semejantes y es mecánicamente más simple que el modelo de simple rueda motora ya que no requiere de la rotación de las mismas, sin embargo el control para realizar los movimientos de rotación y traslación curvilínea son más complejos puesto que requieren la coordinación de las dos ruedas. En la figura 14 se puede observar la distribución de las ruedas en una plataforma móvil.

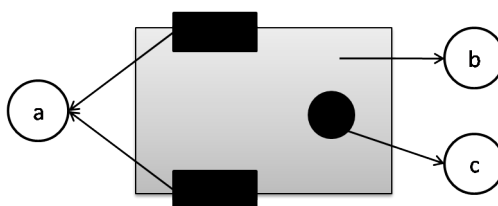


Figura 14: Desplazamiento diferencial. a) Ruedas motoras, b) Elemento seguidora y c) Plataforma del robot móvil

2.2.2. Representación de posición del robot

En el siguiente análisis se va a modelar el robot como un cuerpo rígido con ruedas que se desplaza en el plano horizontal. La plataforma tiene tres dimensiones, dos para la posición en el plano y una más para la orientación en el eje vertical, la cual es ortogonal al plano.

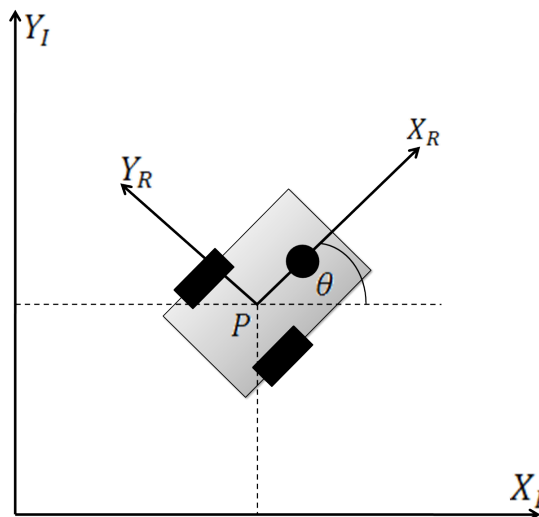


Figura 15: Plano global y plano referencial del robot

Con la finalidad de especificar la posición del robot en el plano, se realiza una relación entre los ejes del plano global y los ejes del plano referencial del robot como se puede observar en la figura 15. Los ejes Y_I y X_I definen un plano arbitrario que se va a utilizar como referencia global. Para especificar la posición del robot se ubica en el plano global un punto P en la parte rígida del robot como punto de referencia. Los ejes Y_R y X_R son los ejes locales de referencia del robot. La posición de P en el plano global está especificado por las coordenadas x e y . La relación entre el plano global y el plano local del robot está dada por θ . Con estos tres elementos se puede describir la ubicación del robot mediante un vector:

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Para poder describir el movimiento del robot en términos de componentes de movimiento es necesario determinar el movimiento a lo largo de los ejes del plano global con los movimientos a lo largo de los ejes locales del robot. La determinación del movimiento es una función que permite saber la posición actual del robot. Esta actividad se la puede realizar usando la matriz ortogonal de rotación.

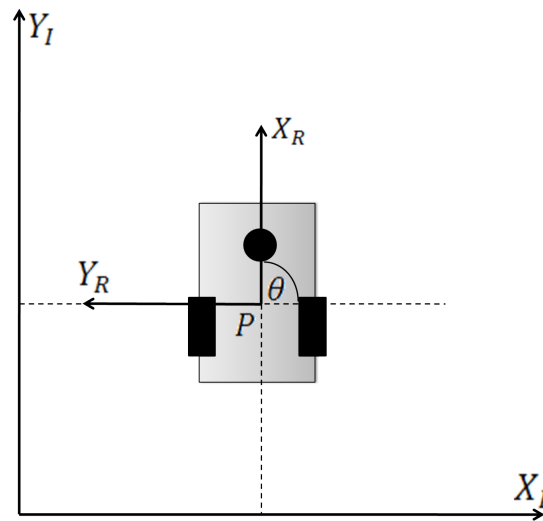


Figura 16: Plataforma móvil alineada con los ejes globales

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Esta matriz puede ser usada para obtener un vector de movimiento del plano global (X_I, Y_I) en términos del plano local del robot (X_R, Y_R) . Mediante la siguiente operación se puede relacionar las variables del plano global, con las variables del plano local del robot:

$$\dot{\xi}_R = R(\theta)\dot{\xi}_I \quad (2.3)$$

2.2.3. Modelo de cinemática directa

En casos simples, la descripción del movimiento mostrada en la ecuación 2.3 es suficiente para interpretar la cinemática directa de la plataforma móvil. Pero en casos más específicos es necesario conocer más variables que describan con mayor detalle el movimiento del robot móvil como la velocidad de cada rueda, ϕ_1 y ϕ_2 , la distancia de las ruedas con el punto de referencia P , l y el diámetro de las ruedas r .

Con el uso de estas variables, un modelo de cinemática directa puede predecir la velocidad eficaz del robot en el entorno global.

$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(l, r, \theta, \phi_1, \phi_2) \quad (2.4)$$

En un desplazamiento diferencial, hay que tener en cuenta que cada rueda genera al movimiento de la plataforma. Por ejemplo, si las ruedas están girando a una misma velocidad, pero en sentido contrario, la plataforma va a girar en su propio eje vertical. La velocidad angular de cada rueda se la puede calcular considerando que la rueda se está moviendo en el arco generado por un círculo de radio $2l$:

$$\omega_1 = \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} \quad (2.5)$$

$$\omega_2 = \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \quad (2.6)$$

Donde ω_1 es la velocidad angular de la rueda derecha y ω_2 es la velocidad angular de la rueda izquierda.

Combinando las ecuaciones 2.5 y 2.6 anteriores y considerando que cada rueda produce la mitad de la velocidad lineal de la plataforma móvil, se puede generar la siguiente fórmula para un modelo de desplazamiento diferencial:

$$\dot{\xi}_I = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{r\dot{\phi}_1}{2} + \frac{r\dot{\phi}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{\phi}_1}{2l} + \frac{-r\dot{\phi}_2}{2l} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.4. Restricciones cinemáticas para ruedas

Para la realización de un modelo matemático, es necesario restringir el movimiento de cada rueda de la plataforma, ya que de esto dependerá el movimiento de toda la plataforma [Siegwart et al., 2011].

Para cualquier tipo de rueda se presentan dos restricciones que hay que considerar. La primera restricción aplica el concepto de contacto de rodamiento, el cual debe girar cuando el movimiento va en dirección correcta. La segunda restricción refuerza el concepto de no deslizamiento lateral, donde la rueda no debe deslizarse ortogonalmente al plano de la rueda.

2.2.5. Rueda fija estándar

La rueda fija estándar, no tiene un eje de rotación vertical, por lo tanto su ángulo con respecto al chasis esta fijo, y su movimiento está limitado a dos direcciones, hacia atrás y hacia adelante.

En la figura 17 se puede observar la representación de una rueda fija estándar y su posición relacionada con el eje local del robot (X_R, Y_R) . El ángulo de la rueda respecto al chasis esta denotado por β y desde que la rueda se fija en el chasis el valor de β

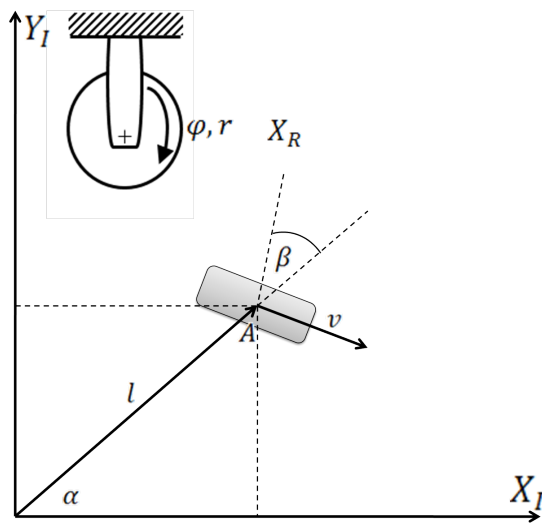


Figura 17: Rueda fija estándar y sus parámetros

es constante. Todo movimiento a lo largo de la dirección del plano de la rueda debe ir acompañado de una cantidad apropiada de giro de la rueda:

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.8)$$

El primer término de la suma denota el movimiento total a lo largo del plano de la rueda. Los tres elementos del vector a la izquierda representan la asignación de cada una de las variables x e y , que contribuyen con el movimiento a lo largo del plano de la rueda. Este movimiento debe ser igual al movimiento realizado por la rueda fija $r\dot{\phi}$.

La limitación de deslizamiento para esta rueda impone que la componente ortogonal de movimiento de la rueda al plano de la rueda debe ser cero:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) & l\sin\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.9)$$

2.2.6. Rueda orientable estándar

La única diferencia entre una rueda orientable y una rueda fija es el grado de libertad adicional, el mismo que le permite a la rueda girar alrededor de un eje vertical que pasa a través del centro de la rueda y el punto de contacto con el suelo.

Las ecuaciones de posición para las ruedas estándar de dirección son similares a las ecuaciones de las ruedas fijas con una diferencia. La orientación de la rueda con el chasis del robot ya no es un valor fijo, ahora varía con el tiempo $\beta(t)$. Las limitaciones de rodamiento y de deslizamiento son:

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l)\cos\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I - r\dot{\phi} = 0 \quad (2.10)$$

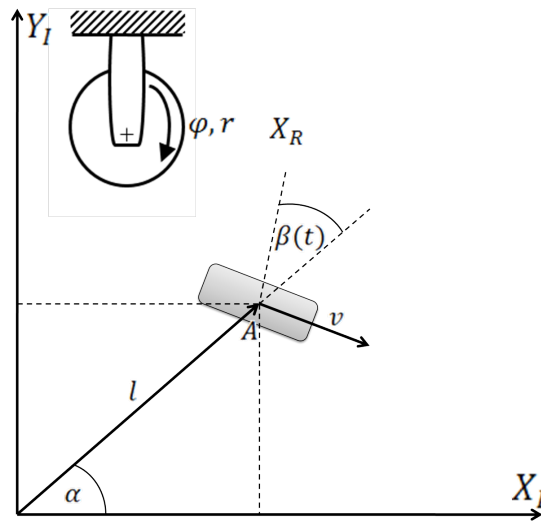


Figura 18: Rueda orientable estándar y sus parámetros

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta) & l \sin \beta \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_I = 0 \quad (2.11)$$

Las limitaciones son las mismas a las ruedas fijas estándar, ya que $\dot{\varphi}$, $\dot{\beta}$ no tienen un impacto directo en el movimiento instantáneo del robot. Solo mediante la integración en el tiempo se verá reflejado cambios en la dirección que afecten a la movilidad del robot.

2.2.7. Rueda castor

La rueda castor es capaz de conducir alrededor de un eje vertical. A diferencia de la rueda estándar de dirección, el eje vertical no pasa por el punto de contacto con el suelo.

Como se puede observar en la figura 19, se requiere un parámetro adicional d . También, se evidencia que el punto de contacto de la rueda con el piso se desplazó al punto B . Ahora la rueda tiene dos parámetros que varían con respecto al tiempo, $\varphi(t)$ representa el giro de la rueda y $\beta(t)$ denota el ángulo de dirección y la orientación del segmento AB . La ecuación de rodadura es idéntica a las ruedas anteriores ya que el eje desplazado no interviene durante el movimiento:

$$\begin{bmatrix} \sin(\alpha + \beta) & -\cos(\alpha + \beta) & (-l) \cos \beta \end{bmatrix} R(\theta) \dot{\xi}_I - r \dot{\varphi} = 0 \quad (2.12)$$

La geometría tipo castor, si tiene un impacto en la limitación de movimiento. La cuestión fundamental es que la fuerza lateral en la rueda se produce en el punto A , porque ese es el punto de acople con el chasis del robot. Ya que el punto de contacto

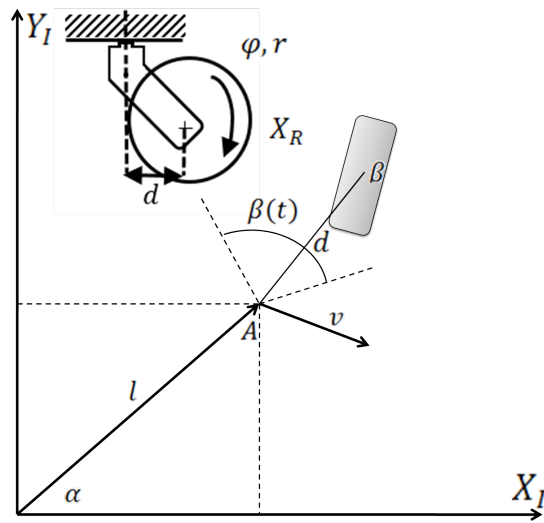


Figura 19: Rueda de castor y sus parámetros

de la rueda con el piso se encuentra a una distancia d del punto de acople con el chasis del robot, es necesario desplazar la fuerza al punto A obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & \sin(\alpha + \beta)d & l\sin\beta \end{bmatrix} R(\theta)\dot{\xi}_I + d\dot{\beta} = 0 \quad (2.13)$$

En la ecuación 2.13, cualquier movimiento ortogonal al plano de la rueda debe ser equilibrada por una cantidad equivalente y opuesta a la dirección de movimiento de la rueda castor.

2.2.8. Limitaciones cinemáticas del robot

En un robot móvil, cada rueda puede imponer una limitación al movimiento, lo ideal es que no existan estas limitaciones. La rueda tipo castor no impone limitaciones cinemáticas en el chasis del robot, ya que puede oscilar libremente debido al grado de libertad adicional que posee [Siegwart et al., 2011]. Por lo tanto, solo las ruedas fijas y las ruedas orientables, tienen un impacto en la cinemática del chasis del robot y por lo tanto requieren una consideración al calcular las limitaciones cinemáticas del robot. Supongamos que el robot cuenta con N_f ruedas fijas y N_s ruedas orientables. Se usa $\beta_s(t)$ para denotar los ángulos variables de las ruedas orientables y se usa β_f para denotar los ángulos variables de la ruedas fijas. En caso que las ruedas giren, denotamos la velocidad angular de cada rueda por separado $\varphi_f(t)$ y $\varphi_s(t)$ y utilizamos los dos valores en una matriz $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_f(t) \\ \varphi_s(t) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Las limitaciones de giro para todas las ruedas se las puede expresar con la siguiente ecuación:

$$J_1(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I - J_2\dot{\phi} = 0 \quad (2.15)$$

J_2 es una matriz diagonal de $N \times N$ constante, cuyas entradas son radios r de todas las ruedas estándar. $J_1(\beta_s)$ denota una matriz con las proyecciones para todas las ruedas y sus movimientos a lo largo del plano individual de la rueda.

$$J_1(\beta_s) = \begin{bmatrix} J_{1f} \\ J_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

J_{1f} es una matriz constante de proyección para todas las ruedas fijas y su tamaño es de $(N_f \times 3)$, y cada fila contiene los tres términos de la ecuación 2.8. $J_{1s}(\beta_s)$ es una matriz constante de proyección para todas las ruedas orientables y su tamaño es de $(N_s \times 3)$, y cada fila contiene los tres términos de la ecuación 2.10.

De la misma forma podemos utilizar la misma técnica para coleccionar las limitaciones de deslizamiento para todas las ruedas estándar en una sola expresión con la misma estructura de las ecuaciones 2.9 y 2.11:

$$C_1(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.17)$$

$$C_1(\beta_s) = \begin{bmatrix} C_{1f} \\ C_{1s}(\beta_s) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

C_{1f} y $C_{1s}(\beta_s)$ son matrices de $(N_f \times 3)$ y $(N_s \times 3)$ respectivamente y sus filas contienen los términos de la matriz de las ecuaciones 2.9 y 2.11.

2.2.9. Maniobrabilidad del robot móvil

La movilidad cinemática de un robot es la capacidad de desplazarse directamente por el entorno. La restricción básica que tiene el movimiento es que cada rueda debe de satisfacer su limitación de deslizamiento. Adicional al movimiento cinemático, un robot puede manipular su posición en el tiempo, debido a que posee ruedas orientables [Siegwart et al., 2011].

Resumiendo, la maniobrabilidad es una combinación de la movilidad disponible en base a las limitaciones de deslizamiento de las ruedas estándar y la libertad adicional que brindan las ruedas orientables al girar las ruedas.

2.2.10. Grado de movilidad

La ecuación 2.17 aplica la limitación que cada rueda debe cumplir para evitar el deslizamiento lateral. Esta ecuación se lo puede separar para ruedas fijas y ruedas orientables:

$$C_{1f}R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.19)$$

$$C_{1s}(\beta_s)R(\theta)\dot{\xi}_I = 0 \quad (2.20)$$

Las limitaciones cinemáticas para las ecuaciones 2.19 y 2.20 se pueden demostrar geoméricamente utilizando el concepto del centro instantáneo de rotación (CIR). Considere que una sola rueda estándar es forzada a tener cero movimientos laterales por la limitación de deslizamiento. Esto puede ser representado geoméricamente dibujando una línea de movimiento nulo en su eje horizontal, perpendicular al plano de la rueda. Esto significa que no puede moverse en la línea de movimiento nulo, por lo tanto, se va a mover a lo largo de un círculo de radio r . El centro del círculo está ubicado en la línea de movimiento nulo. Este centro es el centro instantáneo de rotación.

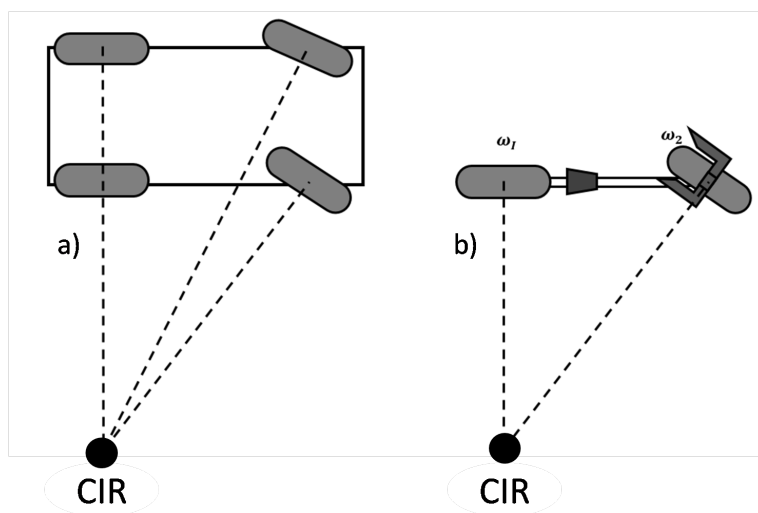


Figura 20: a) Vehículo de dirección Ackerman de cuatro ruedas b) Bicicleta

Un robot con el mecanismo de Ackerman (figura 20a) puede tener varias ruedas, pero siempre debe tener un solo CIR. Esta construcción geométrica demuestra como la movilidad del robot es una función del número de limitaciones de su movimiento, más no del número de ruedas [Siegwart et al., 2011]. En la figura 20b, cada rueda de la bicicleta implica una limitación de movimiento. En conjunto, las dos limitaciones dan lugar a un solo punto como única solución para el CIR. Esto es porque las dos limitaciones son independientes y por lo tanto limita aún más el movimiento global

del robot.

La interpretación matemática de la independencia está relacionado con el rango de una matriz [Siegwart et al., 2011]. El rango de una matriz determina el mayor número de limitaciones en las filas o columnas independientes. En la ecuación 2.17 representa todas las limitaciones de deslizamiento impuestas en las ruedas del robot móvil. Por lo tanto el *rango* $[C_1(\beta_s)]$ es el número de limitaciones. Si el rango de limitaciones del robot es igual a tres, entonces el robot está limitado en todas las direcciones y por lo tanto el movimiento en el plano es imposible. El grado de movilidad del robot está dado por:

$$\delta_m = \dim N[C_1(\beta_s)0] = 3 - \text{rango}[C_1(\beta_s)] \quad (2.21)$$

2.3. Percepción

“La percepción como capacidad de los seres vivos, obedece a los estímulos cerebrales que son logrados a través de los sentidos (vista, olfato, tacto, oído y gusto), los cuales dan una realidad física del entorno en el que un individuo se desenvuelve” [Oxford University, 2014]. La percepción es una capacidad única de los seres vivos que permite relacionarnos con los elementos que nos rodean, sin embargo, una tarea de este tipo conlleva un trabajo complejo de comunicación sensorial nerviosa, interpretación, conocimientos y coordinación que muchas veces es difícil de comprender hasta que se lo intenta reproducir en un objeto inanimado como los robots [Jones et al., 2010]. Instalar un nivel de percepción humana en un robot se ha convertido en un tarea realmente difícil. Por ello, los avances tecnológicos sumados a extensas investigaciones han ayudado a desarrollar tecnología capaz de interpretar el entorno en el que se desenvuelve un robot, logrando tener una semejanza sensorial con un agente vivo. Un mecanismo de percepción robótico es ilustrado en la figura 21.

A pesar de tener la capacidad de sentir el entorno, un robot no tiene la capacidad de entender que es lo que se está sintiendo o para que realizó la medición de alguna variable física. Hace falta una unidad de procesamiento que trabaje con la información que le envía el sensor, la interprete y de acuerdo a las reglas de control, tome una decisión. Entonces, podemos decir que el robot está sustentado al tipo de sensor y al código de programación utilizado para regular su comportamiento. Debido a esto, es importante desarrollar niveles de abstracción dentro del algoritmo con la finalidad de que la unidad robótica de la impresión de tener inteligencia propia.

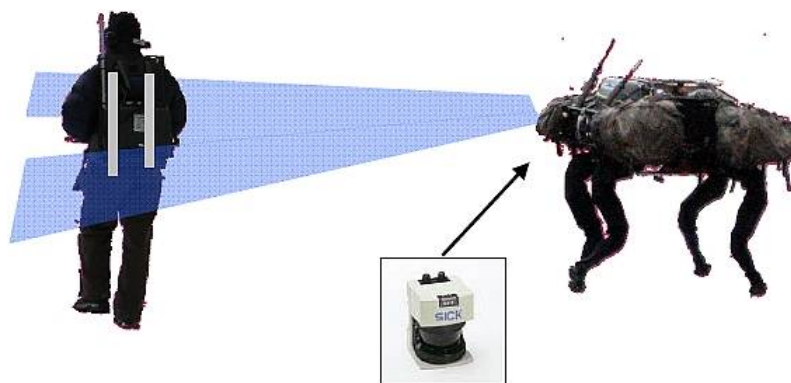


Figura 21: Mecanismo de percepción de un robot

Fuente: [Jones et al., 2010]

2.3.1. Sensores

Existe una extensa lista de sensores que pueden ser usados en aplicaciones robóticas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que un sensor funciona de una manera óptima si ha sido dimensionado correctamente. Esto implica que se debe profundizar en el análisis de características físicas y operativas de los instrumentos de medida. Ciertos puntos a considerar en el dimensionamiento de un elemento sensitivo son el principio de funcionamiento, sensibilidad, tamaño, peso, rangos operativos de temperatura y humedad, consumo de energía, precios, entre otros [Bräunl, 1998].

Es importante tener en cuenta estos aspectos puesto que deben tener concordancia con los diferentes ambientes en los que se desenvuelve, los tipos de navegación para el que ha sido diseñado, las prestaciones y exigencias requeridas por un robot móvil. La figura 22 nos muestra los sensores cuya aplicación en robótica es frecuente.

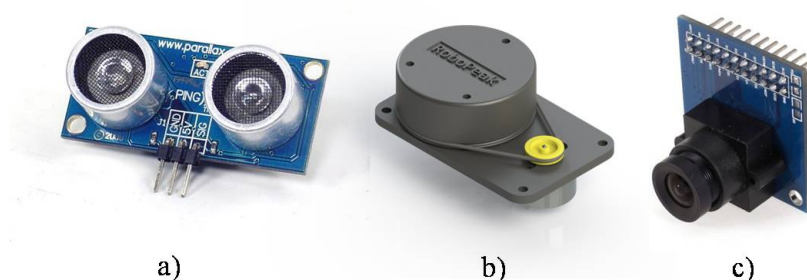


Figura 22: Sensores para robots. a) Sonar, b) Lidar y c) Cámara de vídeo

Fuente: [Open Source Arduino, 2015]

Otro concepto muy importante, que debe ser aprehendido por su uso frecuente en muchas aplicaciones de robótica móvil es la odometría, que no es más que el uso de la información de sensores de movimiento (principalmente encoders) para estimar cam-

bios de posición en el tiempo [Chong & Kleeman, 1997]. Para poder procesar dicha información y obtener un aproximado cercano a la realidad, se requiere de sistemas de adquisición de datos rápidos y precisos, así como de equipos de calibración y procesado para que la odometría sea efectiva.

Se debe comprender que los sistemas sensoriales tienen sus propias fortalezas y debilidades [Holland, 2004]. Por ello seleccionar los sensores apropiados para posicionamiento y orientación de un robot, así como del sistema de procesamiento de la información adquirida tiene suma importancia en el diseño de una plataforma robótica móvil. Con este propósito, se debe determinar diferencias, características, ventajas y desventajas de los sensores. En otras palabras, se debe clasificar a los sensores. Una clasificación muy interesante es la que se realiza tomando diversos puntos de vista [Bräunl, 1998], así tenemos:

- Desde el punto de vista de un robot:
 - Locales: Son sensores que están montados en el robot. Ejemplos típicos son acelerómetros, giroscopios, encoders, entre otros.
 - Globales: Son sensores que están montados en el ambiente en el que se desenvuelve el robot. Por ejemplo un sistema de posicionamiento global o GPS.
- Desde el punto de vista de un robot móvil:
 - Internos: Son sensores que monitorean el estado interno del robot. Ejemplos comunes son los sensores de batería, temperatura, humedad, entre otros.
 - Externos: Son sensores que monitorean el entorno del robot. Por ejemplo, las cámaras a bordo o los escáneres láser.
- Una distinción adicional es:
 - Pasivos: Son sensores que monitorean el ambiente sin perturbarlo. Por ejemplo las cámaras digitales o los giroscopios.
 - Activos: Son sensores que estimulan el ambiente para realizar la medición. Casos como el sonar o las cámaras infrarrojas forman parte de este grupo.

2.3.2. Sensores de un robot móvil

Para hablar de los sensores de un robot móvil se debe considerar las técnicas utilizadas para guiarlos. En los primeros años de desarrollo de este tipo de autómatas se logró controlar el desplazamiento de los robots mediante caminos físicos. Así pues, se diseñaron rieles, ranuras en el piso, cables enterrados, pintura visible, pintura química invisible, incluso caminos magnéticos. La variedad de formas de caminos físicos se debe a que esta técnica de guiado automático es simple y relativamente robusto especialmente en ambientes cambiantes. También, tiene ventajas en la adquisición e implementación de los sistemas de sensado a bajo costo, aunque la instalación y el mantenimiento de los caminos no presenta tal característica. Otra desventaja de los caminos físicos es que carecen de flexibilidad.

Con el avanzar de los años, el desarrollo de la tecnología permite dar un salto en las técnicas de guiado. Entonces, se sustituye los caminos físicos por técnicas que permiten independizar a los robots móviles. Si bien es cierto, aún existen dichos caminos como sistema de apoyo de una distribución física, al realizar un trabajo más esmerado se puede obtener una liberación absoluta de ellos.

En la actualidad existen varios sensores que ayudan a automatizar la navegación de un robot móvil. El sonar, lidar, GPS, cámaras de vídeo y recientemente el sistema de visión Kinect desarrollado por Microsoft son algunos ejemplos que serán brevemente descritos a continuación.

2.3.2.1. Sonar

Este dispositivo se encuentra presente en la mayoría de los robots para interiores como parte fundamental de la capacidad de evitar colisiones [Holland, 2004]. Este tipo de sensor está basado en el principio de navegación de los murciélagos, los mismos que emiten un sonido ultrasónico que al rebotar en las paredes u obstáculos es captado por los sensibles oídos del animal, logrando orientarse de forma eficiente. Un modelo típico de sonar electrónico es mostrado en la figura 22a.

A pesar de tener una gran aceptación en el desarrollo de la robótica móvil, un sonar posee un rango de alcance pequeño y una tendencia a especular con la señal de retorno, esto lo convierte en un elemento poco confiable si está trabajando fuera de los límites de distancia y de ángulo. Para reducir errores a causa de estos problemas se ha considerado distribuir sensores ultrasónicos (como también es conocido un sonar) en un anillo como el mostrado en la figura 23.

Con esta distribución se puede decir que la distancia adquirida tiene el mismo peso informativo, pero en realidad la información más importante es la que entregan

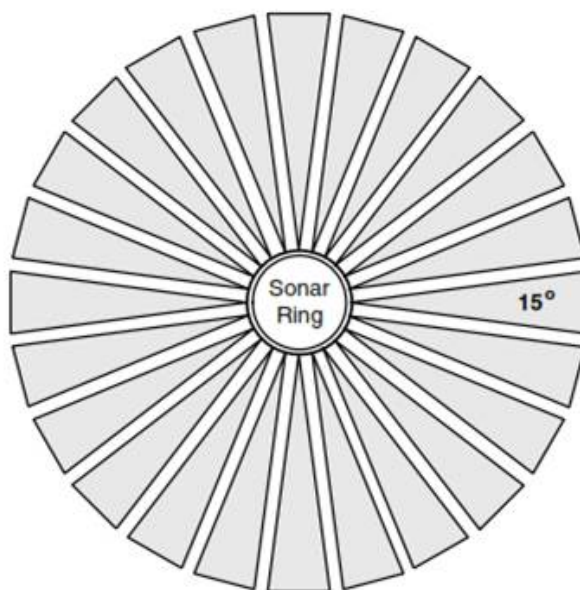


Figura 23: Anillo de sensores ultrasónicos
Fuente: [Holland, 2004]

los sensores delanteros del robot móvil. Es aquí donde se genera un nuevo problema de integración de estos dispositivos, pues dependiendo del posicionamiento vertical de los sensores, estos solo entregarán ciertos datos del frente del robot. La figura 24 nos muestra que los sonares no son capaces de captar obstáculos por encima y por debajo del rango angular de los sensores.

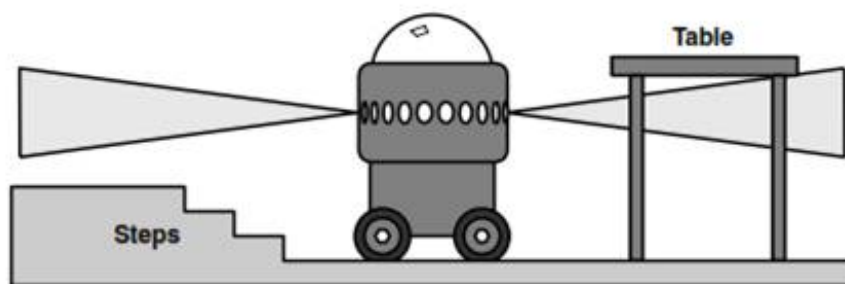


Figura 24: Cobertura vertical del anillo de sonares
Fuente: [Holland, 2004]

La solución a este problema, desde el punto de vista más evidente, sería plantear una distribución vertical de sonares. Sin embargo, al considerar que el dispositivo es capaz de captar la presencia de objetos en un espacio angular, dicha solución se restringe. Se deben posicionar a una distancia considerable del piso ya que el sonido que emiten los sonares puede ser desviado por la rugosidad del piso, paredes o incluso partes del mismo robot, lo que provocaría una adquisición de datos errada. Este es la

principal razón por la cual la técnica de guiado por sonar aún debe apoyarse en otras.

2.3.2.2. Lidar

El lidar es la siguiente generación de sistemas de medición de distancia a partir de un emisor luminoso láser después del haz de luz fijo. Hoy en día, el lidar se convertido en el sensor más popular para la navegación robótica. Esto debido a la simplicidad del dispositivo y las prestaciones que brinda si son comparados con una distribución anillo de sonares [Holland, 2004].

Un lidar tiene el mismo principio de funcionamiento que un sonar, pero en lugar de emitir un sonido ultrasónico, emite una luz láser. Esta característica permite realizar una mayor cantidad de mediciones en un tiempo determinado puesto que la luz viaja más rápido que el sonido. Además, la tasa de pérdida de energía en el viaje del agente rebotante es menor, por ello se consigue sensar distancias de diez metros o más con la misma cantidad de energía suministrada al emisor. Una de las principales desventajas es la detección de patrones planares puesto que no tiene angulo de desviación como un sonar. También, tiene un diseño complejo desde el punto de vista mecánico y es propenso a daño por colisiones o vibraciones del robot móvil. La figura 22b nos indica un ejemplo típico de lidar para aplicación directa sobre un robot.

2.3.2.3. Sistema de posicionamiento global

El sistema de posicionamiento global o GPS (por sus siglas en inglés) es un sistema de satélites que orbitan alrededor de la tierra. Un robot móvil para exteriores puede utilizar un simple y económico receptor como herramienta de navegación [Holland, 2004]. Un receptor GPS proporciona una posición de forma continua basado en una triangulación de las señales enviadas por los satélites.

La principal desventaja del GPS es la baja resolución que presenta para estimar la posición. Este efecto se hace más notorio cuando se trabaja con un robot móvil pues el sensor provee una posición con un error aproximado de 15 metros. Una forma de contrarrestar esta desventaja es colocar un receptor de GPS en la locación donde se desenvuelve el autómata. El robot recibe un dato de corrección de la posición de este receptor local. Aunque esto ayuda a reducir el error en la posición, todavía presenta una diferencia de 3 metros.

En vista de la falta de precisión en esta técnica de posicionamiento, ha sido descartada en el seguimiento de caminos establecidos dentro de un ambiente industrial [Holland, 2004], por lo que es preferible usarla en robots móviles para exteriores. Sin embargo, al apoyarse en otras técnicas de desplazamiento se puede minimizar el error para uso en interiores.

2.3.2.4. Vídeo

El procesado de imágenes de vídeo ha tenido un enorme avance en los últimos años [Holland, 2004]. Esto debido a la integración de este tipo de componentes en las computadoras personales, facilitando la manipulación de las imágenes, y con ello el procesado de información. Además, esta evolución en los mecanismos de percepción también se ve impulsada por la reducción del tamaño de las cámaras y componentes de digitalización.

Las principales ventajas de los sistemas de vídeo son el bajo costo de implementación y el reducido consumo de energía. Aunque, también presentan desventajas como la necesidad de iluminación adecuada. Las cámaras digitales son el sensor más completo utilizado en aplicaciones robóticas. En la actualidad, el mejoramiento de la velocidad de los procesadores y de la capacidad de memoria han permitido incorporarlas dentro de los sistemas embebidos. En la figura 22c se ilustra este hecho, y nos presenta una cámara de vídeo de dimensiones reducidas diseñada para este tipo de sistema.

En aplicaciones robóticas móviles es importante tener un alta tasa de transferencia de información desde la cámara hacia el procesador pues el autómatas se encuentra en movimiento y se requiere actualizar las imágenes tan rápido como sea posible. Los algoritmos computacionales dependen principalmente de la resolución de la cámara. Es importante conocer que a una mayor resolución se requiere una mayor capacidad de procesamiento. Esto puede llegar a ser un obstáculo en el desarrollo de aplicaciones robóticas móviles, sin embargo, muchos trabajos como EyeBot [Bräunl, 1998] han permitido concluir que una resolución de 60×80 píxeles es suficiente para reconocimiento de formas y colores. La resolución de la cámara tiene una connotación destacada cuando se requiere detectar un objeto a larga distancia.

2.3.2.5. Kinect

Kinect es un novedoso dispositivo desarrollado por Microsoft, que ha aparecido recientemente en el mercado como periférico para el control de videojuegos. Su bajo precio y las prestaciones de los diferentes sensores que incluye, lo convierten en un elemento idóneo para diversas aplicaciones robóticas [Ruiz et al., 2011]. Este dispositivo presenta interesantes características para aplicaciones de robótica móvil, tales como:

- Sensor compacto y ligero que proporciona imágenes RGB y de rango.
- Rápido, con una frecuencia de trabajo de 30 Hertz.

- Rango de trabajo aceptable para la detección de obstáculos, desde 1.2 hasta 3.5 metros, con errores por debajo de 2 cm.
- Relativamente económico.

Kinect ha sido integrado exitosamente al desarrollo de plataformas robóticas móviles, sin embargo, presenta varios problemas a solventar. Por un lado, la cámara Kinect tiene una resolución de 640×480 píxeles, esto sumado a la frecuencia de 30 Hertz, proporciona 307.200 puntos en cada escaneo, lo cual representa un flujo de datos continuo que puede suponer una limitación computacional. Por otro lado, la distancia mínima de funcionamiento es 1.2 metros, es decir, no es capaz de percibir objetos cercanos al robot, lo que supondría un riesgo de colisión para el mismo. Kinect es mostrado en la figura 25.



Figura 25: Sistema de visión artificial Kinect
Fuente: [Zhang, 2012]

2.4. Localización de un robot móvil

Un robot bien diseñado e implementado debe ser capaz de navegar en un entorno apropiado sin ningún problema. Sin embargo, las necesidades operativas nos llevan a preguntarnos ¿dónde está el robot? o ¿cómo va a alcanzar el objetivo?. Estas incógnitas se resuelven cuando concebimos la idea de localización de un robot móvil. Esta temática nos ayuda a determinar la posición de un autómatas con tal precisión que se evita problemas en el desplazamiento y en alcanzar el objetivo.

Hasta este punto, se ha revisado técnicas de navegación que permiten al robot móvil transportarse a lo largo de los caminos físicos de un plano industrial. Esto significa que el autómatas debe ser capaz de ejecutar pequeños programas usando únicamente odometría [Holland, 2004]. Estos programas nos permitirán saber que un robot esta haciendo lo correcto en cuanto a movimientos básicos, aunque sin correcciones en la navegación y localización, el autómatas terminará desorientado del objetivo que quiere alcanzar.

En muchos escenarios aplicativos de robots móviles se necesita saber la posición y orientación de los autómatas todo el tiempo [Bräunl, 1998]. Por ejemplo, un robot limpiador necesita asegurarse de cubrir todo el piso sin repetir u olvidar trayectos. También, un robot de oficina necesita ser capaz de navegar por el piso del edificio, sin dejar de lado su posición y orientación relativa respecto al punto de partida.

El alcance de la localización no se limita únicamente a determinar la posición, sino a resolver los problemas que plantea el colocar un robot móvil en un entorno y posición desconocidos y que él mismo sea capaz de construir incrementalmente un mapa consistente del entorno, al tiempo que utiliza dicho mapa para determinar su propia localización [Cetto, 2003]. Este es el principio del cual nace la localización y mapeo simultáneos o SLAM (por sus siglas en inglés).

El ruido presente en los sistemas sensoriales, los inevitables errores y aproximaciones cometidos en los modelos empleados y la dificultad representativa de los entornos a medida que éstos aumentan en complejidad hacen que la tarea de resolver el mencionado problema sea ardua [Siciliano, 2002]. Tal complejidad tiene dos aspectos importantes a comprender:

- La necesidad de razonar en un mundo confuso, en ocasiones dinámico y cambiante, aprehendido mediante sensores que distan mucho de ser perfectos.
- La cantidad de información disponible, así como las técnicas empleadas en su procesamiento, interpretación y combinación que termina por determinar los recursos necesarios para la construcción del mapa

Con estos antecedentes sobre SLAM, nos encontramos siempre con la necesidad de trabajar con cantidades progresivamente crecientes de información (contaminada en mayor o menor medida por ruido), manipulada mediante modelos que, la mayoría de las veces, solo son aproximaciones de la realidad. Por ello las soluciones más exitosas hasta el momento desarrolladas son las que utilizan técnicas probabilísticas [Siciliano, 2002].

2.4.1. Formulación del problema del mapeo y localización simultáneos

En un caso hipotético, al desplazarse un robot móvil, una medida exacta del giro de sus ruedas, combinada con un modelo exacto de su movimiento, nos permitirían determinar exactamente la posición del robot. De esta manera, podríamos construir un modelo perfecto del entorno.

Si bien es cierto, los sensores son capaces de dar una medida con precisión y exactitud elevadas, aún no son totalmente confiables pues existe una inevitable incertidumbre derivada de las imperfecciones de los sensores y modelos matemáticos empleados [Siciliano, 2002]. En palabras más sencillas, el simple hecho de desorientar al sensor puede generar errores en las medidas adquiridas. Esto origina la necesidad de acomodar estas incertidumbres en las soluciones obtenidas.

La manera evidente de hacerlo es considerar que tanto la posición del robot como los elementos que modelan su entorno son variables aleatorias. Los algoritmos existentes modelan ambos de manera probabilística y utilizan métodos de inferencia para determinar la configuración que es más probable, teniendo en cuenta las medidas que se van obteniendo.

Para ello, se ha adaptado el teorema de Bayes, el mismo que expresa la relación entre la probabilidad de los eventos A y B, así como la probabilidad condicional de A dado B y B dado A. Matemáticamente se expresa así:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \times P(A)}{P(B)} \quad (2.22)$$

De forma más sencilla y aplicada a la temática tratada, si queremos obtener información sobre el estado del robot dentro del mapa (A) basándonos en el conjunto de medidas realizadas por el sistema sensorial (B), debemos resolver la igualdad planteada en la ecuación 2.22. Existen diversas soluciones para dicha ecuación, pero debido al uso frecuente en robótica móvil, analizaremos los siguientes:

- Filtro extendido de Kalman
- Maximización de la expectativa
- Filtro de partículas

2.4.2. Filtro extendido de Kalman

La utilización del filtro extendido de Kalman es una de las soluciones con más adaptaciones al problema de mapeo y localización simultáneos (SLAM) y que mejores resultados ha dado cuando ha sido llevado a la práctica [Welch & Bishop, 1995].

Para comprender este filtro es importante definir los componentes y el algoritmo, los mismos que fueron diseñados para solventar problemas de sistemas lineales.

2.4.2.1. Componentes del filtro de Kalman

Modelo de estado: Contiene las variables de interés. En él se describe el estado del sistema dinámico y representa sus grados de libertad. Las variables en el vector de

estado no se puede medir directamente, sino que se puede deducir de los valores que se pueden medir. Los elementos del modelo de estado puede ser posición, velocidad, ángulos de orientación, entre otros. Con el fin de ejemplificar este vector planteamos lo siguiente:

$$x_t = \begin{bmatrix} s_t \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Donde x_t es el vector de estado, s_t la posición y v_t la velocidad. El vector de estado tiene tres formas particulares. Estas son el valor actual x_t^- , el valor de la predicción x_t y el valor de la corrección x_t^+ . De esta manera tenemos:

$$x_t^- = \begin{bmatrix} s_{t-1} \\ v_{t-1} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$x_t = \begin{bmatrix} s_t \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$x_t^+ = \begin{bmatrix} s_{t+1} \\ v_{t+1} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Modelo dinámico: Describe el vector de estado en el tiempo. Por lo general se representa por un sistema de ecuaciones diferenciales lineales. Por ejemplo:

$$s_t = s_{t-1} + v_{t-1} + \frac{1}{2} \cdot a_t \cdot T^2 \quad (2.27)$$

$$v_t = v_{t-1} + a_t \cdot T \quad (2.28)$$

Modelo de observación: Representa la forma en la que el autómata percibe el entorno en el que se desarrolla, es decir son las mediciones. Matemáticamente se expresa:

$$z_t = \begin{bmatrix} s_t \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Donde z_t es la modelo de observación, s_t la posición medida a través del sistema sensorial. Al igual que el vector de estado, el modelo de observación tiene un valor actual z_t^- , el valor de la predicción z_t , pero no tiene un valor de corrección. Así tenemos:

$$z_t^- = [s_{t-1}] \quad (2.30)$$

$$z_t = [s_t] \quad (2.31)$$

Modelo de control: Representa los comandos que son entregados a los actuadores. Se representa mediante u_t .

2.4.2.2. Algoritmo del filtro de Kalman

El filtro de Kalman fue diseñado para para estimar el estado de un sistema dinámico lineal mediante dos pasos: la predicción y la corrección.

Predicción: Es el proceso donde se obtienen una predicciones del vector de estado y del modelo de observación. La primera se adquiere al al resolver las ecuaciones diferenciales lineales del modelo dinámico (ecuación 2.32), mientras la segunda se adquiere al integrar la predicción del vector de estado con el modelo de observación actual (ecuación 2.33).

$$x_t = A \cdot x_t^- + B \cdot u_t + E_x \quad (2.32)$$

$$z_t = C \cdot x_t + E_z \quad (2.33)$$

Donde x_t es la predicción del vector de estado, x_t^- es el vector de estado actual, u_t son las acciones requerida para alcanzar x_t , A y B son matrices que interpretar el fenómeno físico y son contantes, E_x es la matriz gaussiana que integra las desviaciones estándar y covarianzas de las variables de la matriz de estado, z_t es la predicción del modelo de observación, E_z la matriz gaussiana con información de las desviación estándar y covarianza de las variables del modelo de observación. Las matrices E_x y E_z se muestran en las ecuaciones 2.34 y 2.35 respectivamente, de acuerdo al caso planteado.

$$E_x = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & \sigma_s \cdot \sigma_v \\ \sigma_v \cdot \sigma_s & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$E_z = \sigma_z^2 \quad (2.35)$$

Donde σ_s y σ_v son desviaciones estándar de la posición y velocidad respectivamente, σ_s^2 y σ_v^2 son covarianzas de las mismas variables y σ_z^2 la covarianza de las medidas.

Si incluimos las ecuaciones 2.27, 2.28 y 2.34 en la ecuación 2.32 tenemos:

$$x_t = \begin{bmatrix} s_t \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{t-1} \\ v_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} [a_t] + \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & \sigma_s \cdot \sigma_v \\ \sigma_v \cdot \sigma_s & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

De la misma manera si integramos las ecuaciones 2.35 y 2.36 en la ecuación 2.33 tenemos:

$$z_t = [s_t] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{t-1} \\ v_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2} \\ T \end{bmatrix} [a_t] + \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & \sigma_s \cdot \sigma_v \\ \sigma_v \cdot \sigma_s & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \right] + \sigma_z^2 \quad (2.37)$$

Corrección: Es el proceso que mejora el vector de estado previsto con el modelo de observación actual y previsto. De forma general se expresa:

$$x_t^+ = x_t + K \cdot (z_t^- - z_t) \quad (2.38)$$

Donde x_t^+ es el valor de la corrección, x_t es la predicción del vector de estado, z_t es la predicción del modelo de observación, z_t^- es el modelo de predicción actual, K es la ganancia de Kalman.

Como se menciona en los puntos anteriores, el filtro de Kalman esta enfocado a sistemas lineales, pero en la práctica el modelo dinámico y el modelo de observación puede ser no lineal. Para resolver este tipo de sistemas se utiliza el filtro de Kalman extendido, el mismo que cumple con la secuencia resolutiva ya expuesta. Únicamente, se debe considerar que esta herramienta linealiza las variables involucradas mediante series de Taylor.

2.4.2.3. Aplicación del filtro extendido de Kalman a la robótica móvil

El filtro extendido de Kalman rastrea la ubicación de los puntos de referencia que el robot móvil ha captado en todo el entorno durante el mapeo. Esto ayuda a desplazarse a lo largo del ambiente. En términos computacionales, este filtro es una de las pocas técnicas que pueden mantener la noción completa de la incertidumbre en el mapa. Este método requiere disponer de un mapa en el cual las entidades que lo componen sean fácilmente parametrizables [Siciliano, 2002]. Esto quiere decir que los elementos que componen el mapa deben ser descritos utilizando un conjunto de parámetros que encajen de forma sencilla en el vector de estado del sistema.

2.4.3. Maximización de la expectativa

El algoritmo de la maximización de la expectativa tiene varios atributos complementarios del enfoque del filtro de Kalman [Siciliano, 2002]. Esto significa que en esta solución se ha realizado grandes avances en el desarrollo de una respuesta al problema del SLAM.

Debido a que este método se ha fundamentado en el filtro de Kalman, los componentes son los mismos que se han mencionado en la sección 2.4.2.1.

2.4.3.1. Algoritmo de la maximización de la expectativa

El algoritmo tratado se compone de dos pasos:

La expectativa: Se obtiene la posición del robot a partir de la información adquirida por el sistema sensorial. Con esta información se debe obtener una distribución probabilística de la siguiente posición. Así tenemos:

$$P(x_t, z_t) = P(x_t^-, z_t^-) \quad (2.39)$$

Donde $P(x_t, z_t)$ son expresiones semejantes a la ecuaciones 2.32 y 2.33, y $P(x_t^-, z_t^-)$ son los modelos de estado y observación respectivamente.

La ecuación 2.39 es difícil de maximizar, dado que la distribución probabilística generalmente es una curva normal estadística. Para reducir esta dificultad se procede a realizar un análisis matemático extenso que deriva en la siguiente expresión:

$$P(x_t, z_t) = E [\log P(x_t^-, z_t^-) | z_t^-] \quad (2.40)$$

Con esta ecuación podemos desarrollar la etapa de maximización con mayor facilidad.

La maximización: La etapa de maximización, matemáticamente se expresa:

$$P(x_t^+, z_t^+) = \arg \max [P(x_t, z_t)] \quad (2.41)$$

Si incluimos la ecuación 2.40 dentro de la expresión 2.41 tenemos:

$$P(x_t^+, z_t^+) = \arg \max \{ E [\log P(x_t^-, z_t^-) | z_t^-] \} \quad (2.42)$$

Donde *arg max* indica el argumento a ser maximizado, en este caso es la probabilidad de la siguiente posición del robot. Una de las formas más sencillas para maximizar una curva es utilizando la derivada. Es importante mencionar que este proceso solo

presenta un punto máximo pues la curva analizada generalmente es una distribución normal estadística. Así tenemos:

$$P(x_t^+, z_t^+) = \frac{\partial}{\partial P} E[\log P(x_t^-, z_t^-) | z_t^-] \quad (2.43)$$

Los dos pasos del proceso iteran hasta converger de forma que pueden proveer una precisión incremental del mapa del ambiente.

2.4.3.2. Aplicación de la maximización de la expectativa a la robótica móvil

La principal debilidad del algoritmo es que, a diferencia del filtro de Kalman, no mantiene una noción completa de la incertidumbre. Esto significa que el algoritmo puede quedar “atrapado” durante su proceso iterativo de corrección del mapa en sus dos etapas. El algoritmo también es computacionalmente costoso, pero eficiente en la construcción de escenarios. No se recomienda su aplicación en ambientes dinámicos [Siciliano, 2002].

2.4.4. Filtro de partículas

Es un método empleado para estimar el estado de un sistema que cambia a lo largo del tiempo [Siciliano, 2002]. Su uso es muy frecuente en mecanismos de visión artificial para el seguimiento de objetos en una secuencia de imágenes.

2.4.4.1. Componentes del filtro de partículas

Este filtro se compone de cuatro elementos. Los mismos son:

Partículas: Son posibles estados del proceso que se pueden representar como puntos en el modelo de estado de dicho proceso. Estas partículas están asociadas a un peso probabilístico. Las partículas suelen generar una curva probabilística. Matemáticamente podemos definir las como:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2.44)$$

Al igual que en las dos soluciones al problema bayesiano, estas partículas pueden tener dos estados diferentes. El valor actual (ecuación 2.45) y el valor de estimación (ecuación 2.46). Así tenemos:

$$\{x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-\} \quad (2.45)$$

$$\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2.46)$$

Pesos probabilísticos: Son valores numéricos que indican la probabilidad de que una partícula se repita en el siguiente estado (actualización). Se definen de la siguiente manera:

$$\{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad (2.47)$$

Los pesos probabilísticos tiene dos estados posibles. El valor actual (ecuación 2.48) y el valor de actualización (ecuación 2.49). Así tenemos:

$$\{w_1^-, w_2^-, \dots, w_n^-\} \quad (2.48)$$

$$\{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad (2.49)$$

Modelo de observación: Es un sistema vectorial que representa la forma en la que el autómata percibe el entorno en el que se desarrolla.

Modelo de control: Representa los comandos que son entregados a los actuadores.

2.4.4.2. Algoritmo del filtro de partículas

El objetivo de esta solución a la ecuación 2.22 es estimar el estado posterior de las variables o partículas dadas las variables de observación [Siciliano, 2002]. En términos de robótica móvil, se puede estimar la posición de la plataforma, basándose en la probabilidad de repetir una medida captada por el sistema sensorial del autómata. Este filtro posee cuatro etapas principales:

Inicialización: Se crea un conjunto de partículas S^- ordenados de acuerdo al peso probabilístico de cada partícula. De esta forma tenemos:

$$S^- = [x_i^-, x_{i+1}^-, x_{i+2}^-, \dots, x_{i+n}^-] \quad (2.50)$$

Actualización: Se realizan cálculos que asignan un nuevo valor a cada una de estas partículas. Estos cálculos se realizan a partir de la información adquirida a través del sistema sensorial. Entonces tenemos:

$$x_i = P(x_i | u, x_i^-) \quad (2.51)$$

$$w_i = P(z, x_i) \quad (2.52)$$

Donde x_i es el valor de actualización de cada partícula, u es el modelo de control, x_i^- es el valor actual de cada partícula, w_i es el valor de actualización del peso de cada partícula y z es el modelo de observación.

Estimación: Con los pesos de las partículas diferentes a los valores iniciales, se procede a realizar un nuevo ordenamiento. Esto creará un nuevo conjunto de partículas que reemplazará al conjunto inicial. En esta etapa se espera que los nuevos valores sean más cercanos a la realidad. Expresado matemáticamente se muestra:

$$S = [x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+n}] \quad (2.53)$$

El conjunto de partículas obtenido en la etapa de estimación reemplaza al conjunto de la etapa de inicialización, por consiguiente el siguiente paso sería la actualización. Este ciclo se repite hasta que el objeto diste lo suficiente del sistema sensorial como para no ser captado [Siciliano, 2002].

2.4.4.3. Aplicación del filtro de partículas a la robótica móvil

El filtro de partículas ayuda a estimar la posición y orientación de un robot móvil dentro de un ambiente. La aplicación de esta solución al problema del SLAM crece en complejidad resolutive y tiende a sufrir degeneración debido a la dependencia de datos pasados [Siciliano, 2002].

Esta herramienta presenta una ventaja computacional, ya que se puede reducir la capacidad de la memoria a utilizar, pues su uso depende únicamente del número de partículas. Sin embargo, la necesidad de respuesta rápida hace que el procesador seleccionado tenga características operativas de velocidad elevadas.

2.5. Planeamiento y localización

El principal reto de darles un sentido de autonomía en las plataformas robóticas móviles es precisamente, el hecho de que los autómatas sean capaces de planear y ubicarse dentro del mapa elaborado. Este proceso es conocido como SLAM, un acrónimo en inglés que significa localización y mapeo simultáneos (simultaneous localization

and mapping). SLAM es un conjunto de técnicas usadas por máquinas digitales para construir un mapa de un ambiente desconocido o actualizar un mapa dentro de un ambiente conocido. Este proceso se realiza en simultaneidad con la determinación de la localización del robot dentro del ambiente físico. Un ejemplo del resultado de SLAM se presenta en la figura 26.

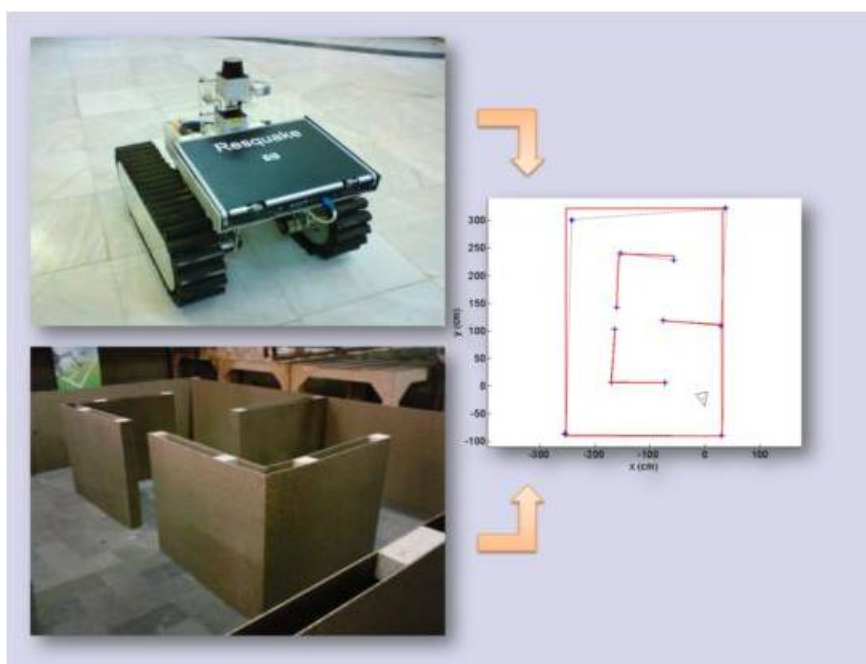


Figura 26: Localización y mapeo simultáneos
Fuente: [Zikos & Petridis, 2014]

2.5.1. Definición operacional de SLAM

Los mapas son usados para determinar la ubicación dentro de un ambiente y para representar un entorno donde se pueda planificar la navegación. Estos mapas son apoyados por la información obtenida a través de un sistema sensorial. Los beneficios de un mapa como soporte en la determinación de la ubicación aumentan cuando la extensión del entorno es amplio. Así mismo, la precisión y la calidad de las mediciones se ven reducidas por la misma causa.

En robótica móvil, la complejidad del proceso técnico de localización y mapeo simultáneos bajo condiciones de errores y ruidos no permiten tener una solución coherente para ambas tareas. SLAM es un concepto que enlaza esos procesos en un lazo y realiza iteraciones retroalimentativas de un proceso a otro que mejora los resultados de ambos procesos.

El mapeo es el problema de integración de la información reunida por un conjunto de sensores dentro de un modelo consistente. Este proceso puede ser definido como la

forma en que el robot mira al mundo. Por otro lado, la localización es el problema de estimar la posición de un robot dentro de un mapa.

Aunque SLAM es definido como un problema de construcción del modelo de un mapa, mientras se pretende determinar la posición del robot dentro de un entorno. En la práctica, las dos características operacionales no pueden ser tratados independientemente.

Para poder desarrollar un modelo óptimo que contribuya a realizar cualquier técnica de SLAM se necesita tener en cuenta varios aspectos, entre ellos:

- La cinemática del robot
- Calidad en la adquisición de la información
- Velocidad de procesamiento de la datos

2.5.2. Tipos de SLAM

Las diferentes técnicas de SLAM se diferencian entre sí debido al tipo de método utilizado para realizar el mapeo y localización simultáneos.

2.5.2.1. EFK SLAM

La utilización del filtro extendido de Kalman para realizar localización y mapeo simultáneos es un tipo de algoritmo utilizado en sistemas robóticos móviles. Durante la última década, el EFK SLAM ha sido el método más utilizado en este tipo de aplicaciones, aunque la introducción del FastSLAM ha reducido su campo aplicativo.

2.5.2.2. FastSLAM 1.0

Los algoritmos basados en el filtro extendido de Kalman, debido a su naturaleza probabilística, requiere una alta capacidad computacional. FastSLAM es un algoritmo que minimiza recursos al estimar recursivamente la posición del robot y los puntos del mapa [Montemerlo et al., 2002]. Este algoritmo ha funcionado de forma satisfactoria en muchos ambientes industriales. FastSLAM es el sucesor de EFK SLAM y su evolución permitió el desarrollo de FastSLAM 2.0. Este algoritmo todavía es utilizado, aunque presenta varias limitaciones en comparación con sus sucesores.

2.5.2.3. FastSLAM 2.0

FastSLAM 1.0 es un algoritmo para la localización y mapeo simultáneos muy eficiente y robusto. FastSLAM 2.0 por su parte, supera a su predecesor en ciertos puntos

deficientes. La modificación realizada en este mecanismo es conceptualmente simple: Cuando se propone una nueva ubicación del robot, el algoritmo no solo se basa en la estimación del movimiento, si no que incorpora las recientes medidas del sistemas sensorial [Roller et al., 2003]. Esto ayuda al desarrollo del algoritmo, en especial en situaciones cuando el ruido del movimiento es alto en comparación con el ruido de la medida. FastSLAM 2.0 es la técnica más utilizada, pues sus principales ventajas son el bajo costo computacional, la alta eficiencia, la fácil implementación, entre otras.

2.5.2.4. L-SLAM

L-SLAM es una versión para dimensiones pequeñas de FastSLAM. Este método utiliza un algoritmo de partículas (filtro de Montecarlo) de menores dimensiones que FastSLAM [Zikos & Petridis, 2014]. Una de sus ventajas es que logra un mejor precisión que sus antecesores para un número pequeño de partículas. A diferencia de FastSLAM que usa el concepto del filtro extendido de Kalman, L-SLAM utiliza el filtro lineal de Kalman.

2.5.2.5. GraphSLAM

Una de las formas más novedosas de resolver el problema del SLAM es utilizando esta técnica. GraphSLAM es un algoritmo computacional que utiliza matrices de información generadas por secuencias de observación [Thrun et al., 2005]. Entiéndase como observación a la matriz de información adquirida mediante una cámara. GraphSLAM integra en su algoritmo el hecho de que dos observaciones están relacionadas si contienen datos sobre el mismo punto de referencia,

2.5.2.6. LSD-SLAM

Esta es una novedosa técnica de SLAM. En lugar de utilizar puntos sobre el mapa como lo hacen FastSLAM y EFK SLAM, opera directamente sobre los contrastes de las imágenes tanto para la localización como para el mapeo [Engel et al., 2014]. La geometría de los mapas se estima usando filtros sobre las imágenes adquiridas en escala de grises. Esta técnica ha sido desarrollada en los últimos años y está disponible como código abierto.

2.6. Resumen

- La historia de la robótica empieza con la gestión de tareas repetitivas y con autonomía limitada. Más adelante se incluyen componentes como visión artificial

o mecanismos de desplazamiento. En los últimos años se ha desarrollado la inteligencia artificial, la misma que logra dar autonomía a los robots.

- Los robots, vistos desde el punto de su estructura, se clasifican en: poliarticulados, móviles, androides, zoomórficos e híbridos.
- Los robots móviles son máquinas autómatas capaces de desplazarse dentro de un ambiente, ya sea que utilice mecanismos de teleguiado o automatismos de control.
- Los robots móviles, visto desde el punto de vista del entorno donde se desarrollan, se clasifican en: aéreos, acuáticos y terrestres.
- Los robots móviles terrestres, visto desde el punto de vista del tipo de mecanismo utilizado para el desplazamiento espacial, se clasifican en: con miembros articulados y con estructura rodante.
- Existen diversos tipos de mecanismos traslacionales para robots móviles. Los más comunes son: desplazamiento por rueda motora única, diferencial, ruedas sincrónicas, mecanismo de Ackerman.
- La cinemática del robot móvil nos permite determinar el modelo matemático del movimiento de autómatas propuestos para este proyecto.
- La percepción de un robot móvil involucra sensores como: sonar, lidar, GPS, cámaras de vídeo, cámara kinect, entre otros.
- La localización de un robot móvil permite determinar la posición de un autómata con la mayor precisión posible. Esto se consigue al combinar la odometría con técnicas probabilísticas como: filtro de Kalman, maximización de la expectativa y el filtro de partículas.
- El planeamiento de un robot móvil se refiere a la capacidad del autómata de realizar localización y mapeo simultáneos (SLAM). Existen diferentes técnicas de SLAM entre las que se mencionan: EKF SLAM, FastSLAM 1.0, FastSLAM 2.0, L-SLAM, GraphSLAM y LSD-SLAM.

Capítulo 3

Metodología y diseño de la plataforma

El capítulo se centra en el diseño y construcción de la plataforma robótica móvil. Basado en el modelo de diseño concurrente [Romeva, 2010], empieza por establecer las necesidades de los usuarios y diseñadores. Luego, se definen las especificaciones que van acorde con dichas necesidades. Tanto las necesidades como especificaciones ayudan en la elaboración de la estructura funcional. Se plantean alternativas de diseño en base a la estructura funcional para luego realizar la evaluación correspondiente. Posterior a ello, se realiza la definición del diseño donde se da origen a la fabricación e implementación de los componentes. Por último, se corrigen posibles fallos y se mejora el diseño en la definición del concepto final.

3.1. Definición de necesidades

La importancia de determinar las necesidades radica en que mediante estas se definen las características y prestaciones que deben guiar el diseño final. Estas necesidades permiten desarrollar especificaciones técnicas del producto.

El título del presente trabajo expone de forma general ciertas necesidades. Sin embargo, existen aspectos adicionales que deben ser considerados a fin de realizar un diseño óptimo. La tabla 1 nos presenta un detalle de necesidades para la concepción de la plataforma robótica móvil. Además, toma en cuenta el origen de las necesidades: usuarios (U) y diseñadores (D). De igual manera, se analizan y clasifican todos los conceptos dados en requerimientos (R) o deseos (D).

Los conceptos mencionados en la tabla 1 se deberán ser tratados y analizados para posterior a ello, generar posibles soluciones para el proyecto. El fin de la mencionada tabla es aclarar los puntos a los cuales se centrará el diseño de la plataforma robótica móvil con el fin de brindar una solución práctica, sencilla y modular.

Tabla 1: Detalle de Necesidades

Concepto	#	Propone	R/D	Necesidad
Función	1	U	R	Diseño para interiores
	2	U	R	Navegación Reactiva
	3	U/D	R	Restringir velocidad de desplazamiento
	4	U/D	R	Sistema inalámbrico
	5	U	R	Capacidad de realizar SLAM
	6	U	R	Operatividad prolongada
Manufactura	7	U/D	R/D	Implementar componentes pequeños
	8	D	R	Estabilidad estática y dinámica
	9	U/D	D	Estructura liviana
	10	D	D	Uso de materiales nuevos
Control	11	D	R/D	Movimientos sencillo
	12	D	R/D	Sensores pequeños y compatibles
	13	U	R	Tecnología de código abierto
Costos	14	D	D	Mantener costos más bajos posibles

Leyenda. U: Usuario, D: Diseñador, R: Requerimiento, D: Deseo.

3.2. Definición de especificaciones

Para desarrollar este punto hay que partir de las necesidades del usuario, que sumadas a un detalle de métricas dan como resultado las especificaciones objetivo de la plataforma robótica móvil. Las métricas son un reflejo medible de las necesidades, por lo tanto al cumplir con estos parámetros, se logra satisfacer las necesidades del usuario.

Tabla 2: Detalle de especificaciones

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
1, 7, 12, 14	Dimensiones máximas de la plataforma	$50 \times 50 \times 20$	<i>cm.</i>
2, 3, 8, 11	Velocidad promedio de desplazamiento	0,5	$\frac{m}{s}$
1, 7, 9, 12	Peso máximo de la plataforma	10	<i>kg.</i>
1, 3, 11, 14	Número mínimo de motores	2	—
1, 8, 11, 14	Número de puntos de apoyo	4	—
4, 6, 14	Duración mínima de la batería	1	<i>hora</i>
1, 2, 5, 12, 14	Distancia máxima de percepción	5	<i>m</i>
5, 12, 13	Uso de tecnología abierta	—	—
14	Costo máximo de producción	700	<i>USD</i>

En la tabla 2 se establecen parámetros que servirán para el diseño del robot. Además, estos valores pueden servir como puntos comparativos con plataformas existentes

en el mercado.

3.3. Definición de la estructura funcional

Otro aspecto importante dentro del desarrollo del concepto de un producto, es determinar la forma de trabajo que este debe tener. Para cumplir con este paso, es necesario tener claro como debe funcionar el producto. Esto permite desglosar la operatividad del mismo y trabajar en módulos. Finalmente, estos módulos permiten distribuir de mejor manera las diversas operaciones funcionales. Para el desarrollo de la plataforma robótica móvil se define la estructura modular mostrada en la tabla 3.

Tabla 3: Módulos de la plataforma robótica móvil

#	Módulo	Funciones
1	Base	Principio de desplazamiento
2	Tracción	Actuadores de desplazamiento
3	Potencia	Acondicionamiento de señales de control
4	Energético	Aporta energía a los componentes
5	Navegación reactiva	Detecta obstáculos
6	Odometría	Registra cambios de posición
7	Adquisición y mando	Adquisición de datos Control en bajo nivel
8	Visión	Permite realizar SLAM
9	Control	Controla los movimientos del robot

3.4. Definición de alternativas de diseño

Para realizar las alternativas de diseño se procederá a dar posibles soluciones a cada una de las estructuras modulares mostradas en la tabla 3.

3.4.1. Módulo 1. Base

El módulo base hace referencia al bastidor que soporta actuadores, sensores, sistemas embebidos y suministro de energía. El primer paso para un adecuado dimensionamiento es determinar el mecanismo de traslación a usar.

Las especificaciones de diseño menciona que el robot móvil debe ser desarrollado con al menos dos motores. Con este prerequisite se definen tres soluciones: a) desplazamiento por rueda motora única, b) desplazamiento diferencial y c) desplazamiento por el mecanismo de Ackerman.

3.4.1.1. Desplazamiento por rueda motora única

Es un modelo sencillo de desarrollar pues implica tener una rueda que haga las veces de directriz y motriz. La propuesta se complementa al posicionar dos elementos adicionales para lograr estabilidad estática y dinámica.

Ventajas

- Los motores no requieren tener las mismas características operativas
- Controles independientes de cada motor
- Capacidad de gira sobre un punto

Desventajas

- Difícil implementación
- Inestabilidad estática y dinámica
- Costo de producción elevado

3.4.1.2. Desplazamiento diferencial

Este modelo posee dos ruedas motoras posicionadas al lado derecho e izquierdo del robot. También, la base se apoya en dos elementos rodantes adicionales.

Ventajas

- Fácil implementación
- Capacidad de giro sobre un mismo punto
- Costo de producción bajo
- Estabilidad estática y dinámica

Desventajas

- Control de traslación curvilínea complejos
- Motores deben tener las mismas características operativas

3.4.1.3. Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman

Esta propuesta incorpora cuatro ruedas. Posiciona un motor en la parte trasera para generar tracción en dos ruedas, mientras que otro se integra a un mecanismo que permite girar dos ruedas directrices frontales.

Ventajas

- Los motores no requieren tener las mismas características operativas.
- Estabilidad estática y dinámica
- Controles independientes de cada motor

Desventajas

- Difícil implementación
- Incapacidad de giro sobre un punto
- Desalineación de ruedas traseras cuando se realiza trazado curvilíneos
- Costo de producción elevado

3.4.2. Módulo 2. Tracción

Estos elementos son los encargados de generar la energía traslacional que moverá a la plataforma robótica móvil. Existe diferentes tipos de actuadores, entre los que se incluyen motores de combustión interna, de corriente alterna y continua. Sin embargo, las dos primeras opciones presentan un costo elevado, así como una instalación compleja comparados con los motores DC. Con este antecedente descrito, la selección de motores para la plataforma robótica móvil estará orientada a determinar ventajas y desventajas de los diferentes tipos de motores de corriente continua. A continuación, un detalle de: a) motor con estator bobinado, b) motor paso a paso y c) servomotor.

3.4.2.1. Motor con estator bobinado

Es el motor de más uso a nivel mundial pues abarca un variedad de tamaños y de parámetros de trabajo.

Ventajas

- Fácil adquisición
- Voltajes de operación de 1.5 a 36 voltios

Desventajas

- Complejidad en el control
- Requiere de sensores adicionales para medir velocidad de rotación
- Incapacidad de mantener el torque cuando esta en reposo
- Difícil implementación

3.4.2.2. Motor paso a paso

Es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos.

Ventajas

- Voltajes de operación de 6 a 36 voltios
- Control sencillo
- Fácil montaje
- No requiere de sensores para medir la velocidad de rotación
- Mantiene el torque cuando esta en reposo

Desventajas

- Difícil adquisición

3.4.2.3. Servomotor

Es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación y mantenerse estable en dicha posición.

Ventajas

- Voltajes de operación de 6 a 36 voltios
- Control sencillo
- Fácil montaje
- No requiere de sensores para medir la velocidad de rotación
- Mantiene el torque cuando esta en reposo

Desventajas

- Difícil adquisición
- Rápido desgaste de los rodamientos
- Operación ruidosa

3.4.3. Módulo 3. Potencia

Este módulo hace referencia al sistema embebido que suministra energía de una forma controlada con el fin de realizar los movimientos rotatorios de los motores. Las alternativas más eficientes para el módulo de potencia son: a) puente H transistorizado, b) puente H circuito integrado y c) control con optoacopladores.

3.4.3.1. Puente H con componentes discretos

El puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico de corriente continua girar en ambos sentidos (avance y retroceso). La propuesta consiste en desarrollar este circuito a partir de componentes discretos. La figura 27 muestra la configuración típica de un puente H transistorizado.

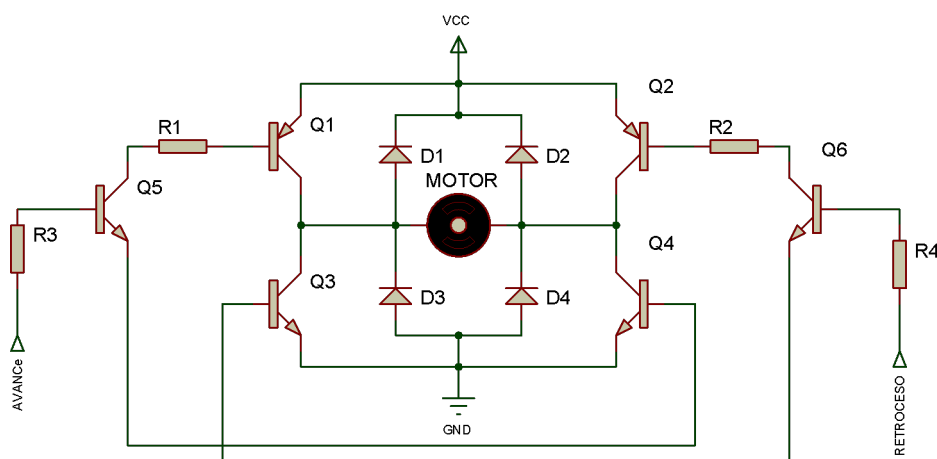


Figura 27: Puente H transistorizado

Ventajas

- Bajo costo
- Soporta altas potencias
- Robusto en cualquier punto de operación

Desventajas

- Difícil implementación
- Requiere un circuitos por cada motor
- No divide circuitos de potencia y de control
- No funciona de manera adecuada en altas frecuencias

3.4.3.2. Puente H circuito integrado

Este es un puente H cuya presentación es reducida ya que integra en un solo microchip todos los componentes discretos requeridos. La propuesta consiste en incorporar este circuito para desarrollar el módulo de potencia tal como se muestra en la figura 28.

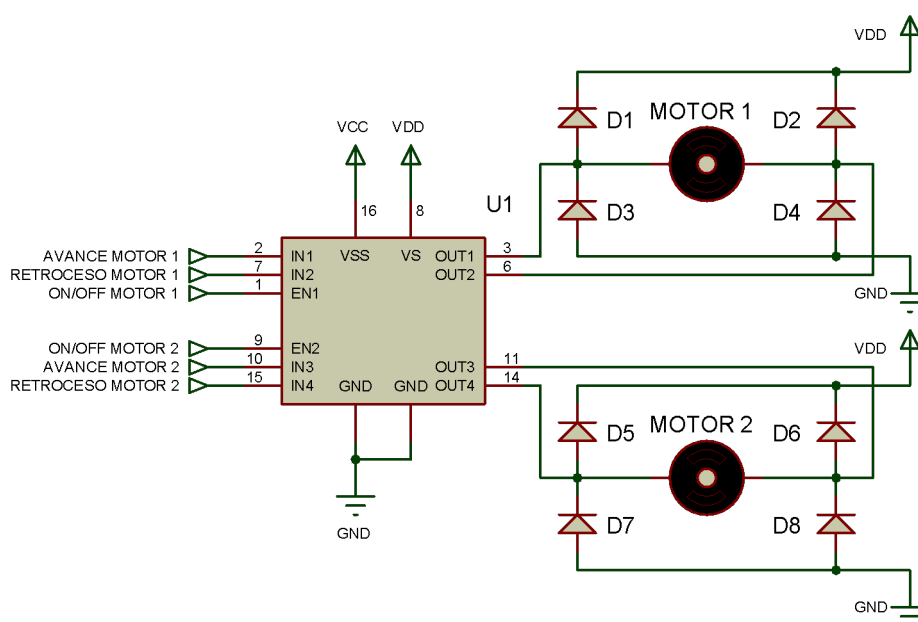


Figura 28: Puente H circuito integrado

Ventajas

- Fácil implementación
- Un circuito integrado para el control de dos motores
- Correcto funcionamiento en altas frecuencias

Desventajas

- Alto costo
- No soporta altas potencias
- No divide circuitos de potencia y de control

3.4.3.3. Control con optoacopladores

Esta propuesta integra en el circuito electrónico optoacopladores para la transmisión de la señales control. La figura 29 muestra una configuración típica de un circuito de este tipo para el control de un motor de corriente directa.

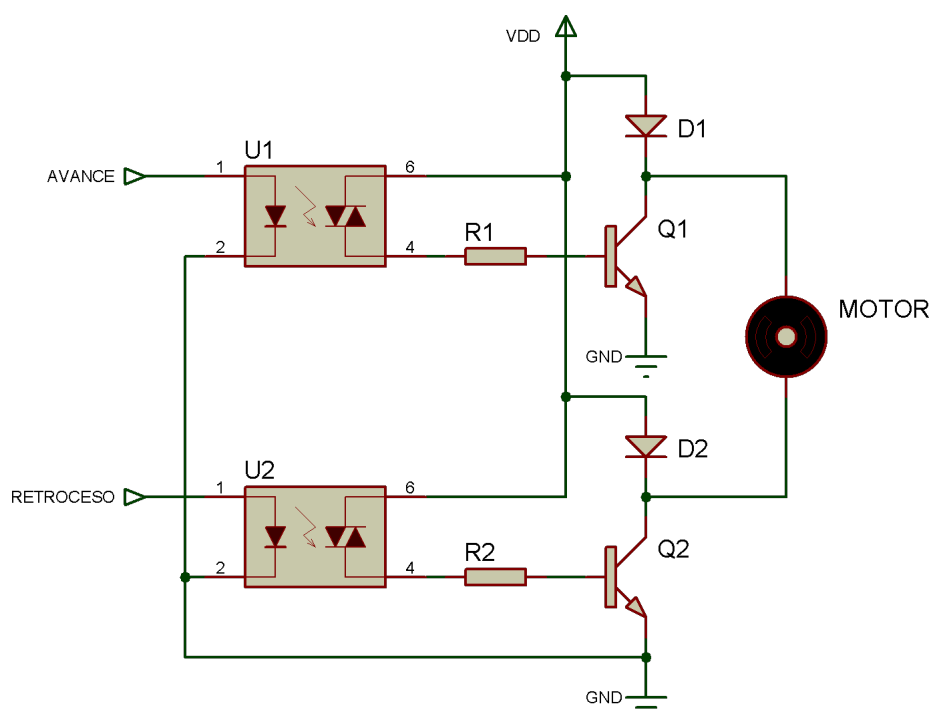


Figura 29: Control con optoacopladores

Ventajas

- Bajo costo
- Divide circuitos de potencia y control
- Soporta altas potencias
- Correcto funcionamiento en altas frecuencias

Desventajas

- Difícil implementación
- Requiere un circuito por cada motor

3.4.4. Módulo 4. Energético

Este módulo entrega energía eléctrica a los diferentes componentes para su funcionamiento. Una de las necesidades de la plataforma es que sea inalámbrica, lo que sugiere los siguientes métodos: a) celda solar, b) alternador y c) batería.

3.4.4.1. Celda solar

Es uno de los métodos energéticos más novedosos en aplicaciones de robótica móvil. Su principio de funcionamiento se basa en la captación de energía luminosa y convertirla en energía eléctrica.

Ventajas

- No contamina
- Fácil montaje
- Innovación en el diseño del robot

Desventajas

- Poco eficiente
- Alto costo
- Gran tamaño para los requerimientos de la plataforma
- Útil solo si el ambiente tiene altos niveles luminosos

3.4.4.2. Alternador

Es un mecanismo que genera electricidad a partir del movimiento rotativo de un motor de combustión interna.

Ventajas

- Alta eficiencia
- Grande en comparación con las otras opciones

Desventajas

- Alto costo adquisitivo y operativo
- Difícil montaje
- Contamina
- Genera calor en el área de trabajo

3.4.4.3. Batería

La batería es uno de los métodos de suministro de energía más utilizados en aplicaciones inalámbricas de robótica.

Ventajas

- Capacidad de almacenamiento de energía
- Tamaño reducido
- No contamina
- Fácil montaje
- Fácil adquisición

Desventajas

- Peso considerable de las baterías
- Necesidad de carga
- Tiempo de carga extenso

3.4.5. Módulo 5. Navegación reactiva

La navegación reactiva es una herramienta que permite a los robots móviles desplazarse por un ambiente evitando obstáculos [Kim & Kim, 2004]. Existen algunos métodos de percepción que pueden ser utilizados para este fin. Para este caso particular, se analizarán los siguientes: a) lidar, b) sonar y c) cámara de vídeo.

3.4.5.1. Lidar

Es un sensor capaz de medir distancia a partir de un láser luminoso. La propuesta presenta un arreglo de 24 lidares alrededor de la plataforma robótica móvil que permiten determinar objetos cercanos en un radio de 5 metros.

Ventajas

- Voltajes de operación de 3.7 a 5 voltios
- Manipulación sencilla de señales
- Fácil montaje
- Mayor volumen de medida
- Menor pérdida de señal rebotante
- Alcance de hasta 20 metros

Desventajas

- Difícil adquisición
- Costo elevado
- Incapacidad de detectar patrones planares
- Poco robusto ante colisiones y vibraciones
- Se ve afectado por la luz ambiental

3.4.5.2. Sonar

La forma de trabajo de este sensor es la misma que el lidar, pero en lugar de haz luminoso utiliza un barrido sonoro. La propuesta con sonar presenta un arreglo de 8 sonares alrededor del robot, esto debido a que el sonar tiene un ángulo de percepción que permite abarcar una superficie mayor. De igual manera, esta propuesta permite determinar objetos cercanos en un radio de 5 metros

Ventajas

- Voltajes de operación de 3.7 a 5 voltios
- Manipulación de señales sencilla
- Fácil montaje
- Fácil adquisición
- Bajo costo
- Robusto ante colisiones y vibraciones
- No se afectado por el ambiente

Desventajas

- Alcance de hasta 5 metros
- Pérdida de señal rebotante
- Presenta ruido en las mediciones

3.4.5.3. Cámara de vídeo

Este sensor requiere de un procesador externo y de alguna técnica de reconocimiento que ayude a determinar objetos. El diseño incluye 4 cámaras de vídeo alrededor de la plataforma robótica móvil.

Ventajas

- Fácil montaje
- Alcance de hasta 20 metros
- Mayor definición de las medidas

Desventajas

- Voltajes de operación de 5 a 12 voltios
- Costo elevado
- Poco robusto ante colisiones y vibraciones

- Se ve afectado por la luz ambiental
- Manipulación de señales complejo
- Requiere de procesador externo

3.4.6. Módulo 6. Odometría

La odometría es la estimación de vehículos con ruedas durante la navegación. Para lograr este fin, se utiliza información sobre los cambios de posición a lo largo del tiempo. Las propuestas a analizar son: a) encoder con giroscopio y b) sensor de desplazamiento óptico

3.4.6.1. Encoder y giroscopio

Un método para determinar el desplazamiento es posicionar un encoder en el eje del motor. Este arreglo envía información sobre la rotación y con ello se puede determinar el desplazamiento que realiza la plataforma móvil. El giroscopio por su parte permite determinar los ángulos de orientación.

Ventajas

- Voltajes de operación de 3,7 a 5 voltios
- Sensores de bajo costo
- Fácil montaje
- Fácil manejo de la señal del giroscopio

Desventajas

- Rebotes en la señal de salida del encoder

3.4.6.2. Sensor de desplazamiento óptico

Este método emplea un láser que dispara pulsos entre 500 a 2000 veces por segundo y que se posiciona junto a un sensor óptico dentro del robot detecta el movimiento del reflejo. Un circuito acondicionador, convierte en un dato manejable y lo envía al procesador.

Ventajas

- Voltajes de operación de 3,7 a 5 voltios
- Bajo costo adquisitivo
- Fácil montaje

Desventajas

- Requiere de un mayor conocimiento de las señales de salida
- Propenso a errores debido a la irregularidad de la superficie

3.4.7. Módulo 7. Adquisición y mando

Este módulo refiere al sistema embebido que se encargará de la recolección de datos de los módulos de navegación reactiva y odometría. También, debe enviar y recibir información del módulo de control para realizar las operaciones requeridas. Para complementar sus funciones, este módulo debe generar las señales de control que rigen el movimiento de la plataforma.

Una de las especificaciones de diseño de la plataforma es que toda la tecnología debe ser de código abierto. Esto sumado a la disponibilidad en el mercado se tiene las siguientes opciones: a) Raspberry, b) Arduino y c) BeagleBone

3.4.7.1. Raspberry

Es un sistema embebido que integra una computadora completamente funcional desarrollada por fundación Raspberry Pi.

Ventajas

- Hasta 256 MB de memoria
- Hasta 700 MHz de velocidad de procesamiento
- Alimentación de 5 voltios
- Soporta distribuciones de Linux
- Bajo costo de adquisición

Desventajas

- Funciona sobre un sistema operativo
- Requiere de hardware adicional para la lectura de sensores
- Posee 8 pines digitales

3.4.7.2. Arduino

Es una plataforma de hardware y software libre basada en un microcontrolador AVR.

Ventajas

- Alimentación de 5 - 12 voltios
- No requiere de hardware adicional para lectura de sensores
- Bajo costo adquisitivo
- Disponibilidad en el mercado
- Posee entre 14 a 54 pines digitales

Desventajas

- 16 MHz de velocidad de procesamiento.
- Hasta 256 KB de memoria

3.4.7.3. BeagleBone

Es una tarjeta de código abierto y bajo consumo energético desarrollada por Texas Instruments.

Ventajas

- 256 MB de memoria
- Velocidad de procesamiento de 700 MHz
- Alimentación de 5 voltios
- Soporta distribuciones de Linux y Android
- Posee 66 pines digitales

Desventajas

- Funciona sobre un sistema operativo
- Alto costo adquisitivo
- Poca disponibilidad en el mercado

3.4.8. Módulo 8. Visión

El módulo de visión es el encargado de recolectar imágenes del entorno donde se desenvuelve la plataforma robótica móvil. Estas imágenes son procesadas en el módulo de control permitiendo hacer la localización y mapeo simultáneos.

3.4.8.1. Kinect

Es un controlador de juegos desarrollado por Microsoft. Su aplicación en sistemas de visión se ha magnificado debido a la facilidad de uso y los resultados obtenidos.

Ventajas

- Alta calidad de imágenes
- Robustez de trabajo
- Incorpora un mecanismo de ajuste de inclinación
- Alta calidad de los controladores
- Se han desarrollado aplicaciones de software libre para la manipulación de datos con Kinect

Desventajas

- Tamaño grande comparado con la otra propuesta
- Requiere una fuente AC/DC

3.4.8.2. Xtion

Es un sensor de movimiento desarrollado por ASUS. Fue desarrollado para control de juegos, pero orientado al uso en computadoras.

Ventajas

- Tamaño reducido comparado con la otra propuesta
- No requiere fuente externa
- Alta calidad de imagen

Desventajas

- No funciona con puertos USB 3.0
- Baja calidad de los controladores
- Ajuste de posición manual
- No existen muchas aplicaciones en software libre para manipular información con Xtion

3.4.9. Módulo 9. Control

El módulo de control hace referencia al controlador que rige los movimientos de la plataforma robótica móvil. También, considera la herramienta informática en la que dicho controlador trabajará. Las opciones más viables para este módulo son: a) Matlab y b) sistema operativo robótico (ROS).

3.4.9.1. Matlab

Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Ventajas

- Disponible para Windows, Linux y Mac OS
- Software con interfaz gráfica
- Fácil manipulación de matrices
- Fácil programación
- Permite la creación de interfaces.

Desventajas

- No es software de código abierto
- Alto costo adquisitivo de licencia
- Requiere computadores con altas prestaciones de rendimiento

3.4.9.2. Sistema operativo robótico (ROS)

En un entorno para el desarrollo de software para robots que provee la funcionalidad de un sistema operativo.

Ventajas

- Software de código abierto
- No requiere computadores con altas prestaciones de rendimiento
- Fácil programación
- Contiene módulos de control desarrollados para realizar el control de la plataforma robótica móvil.
- Contiene módulos de control desarrollados para realizar la localización y mapeo simultáneos (SLAM).

Desventajas

- Disponible únicamente para distribuciones de Linux
- Software sin interfaz gráfica
- Curva de aprendizaje más lenta que otros programas semejantes

3.5. Evaluación y selección de diseño

Para realizar la selección de los componentes, se usa el método ordinal corregido de criterio ponderados.

Como paso inicial para la evaluación y selección de la alternativa de diseño, se debe estandarizar los criterios de valoración para cada módulo. Detallados dichos criterios, se procede a realizar la ponderación de los mismos. Se hace necesaria la elaboración de tablas de ponderaciones en la cual se colocan valores comprendidos entre 0

y 1. Si el valor es 1 significa que el criterio de la fila es más relevante que el criterio de la columna, caso contrario, si el valor es 0 significa que el criterio de la columna es más importante que el correspondiente a la fila.

A continuación se detallan y evalúan las alternativas de los componentes para cada módulo.

3.5.1. Módulo 1. Base

Tabla 4: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 1

Criterio	Costo	Implementación	Control	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Implementación	0	-	1	2	0.33
Control	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Desplazamiento por rueda motora única
- Solución B: Desplazamiento diferencial
- Solución C: Desplazamiento por el mecanismo de Ackerman

Tabla 5: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 1

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 6: Ponderación de implementación para las alternativas de diseño al módulo 1

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 7: Ponderación de control para las alternativas de diseño al módulo 1

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	0	1.5	0.25
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 8: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 1

	Costo	Implementación	Control	Σ	Orden de selección
Solución A	0.17	0.11	0.04	0.32	2
Solución B	0.25	0.17	0.07	0.49	1
Solución C	0.08	0.06	0.06	0.19	3

3.5.2. Módulo 2. Tracción

Tabla 9: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 2

Criterio	Costo	Implementación	Control	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Implementación	0	-	0	1	0.17
Control	0	1	-	2	0.33
			Suma	6	1

- Solución A: Motor con estator bobinado
- Solución B: Motor paso a paso
- Solución C: Servomotor

Tabla 10: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 2

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 11: Ponderación de implementación para las alternativas de diseño módulo 2

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.20
Solución B	1	-	1	3	0.60
Solución C	0	0	-	1	0.20
			Suma	6	1

Tabla 12: Ponderación de control para las alternativas de diseño al módulo 2

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

Tabla 13: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 2

	Costo	Implementación	Control	Σ	Orden de selección
Solución A	0.25	0.03	0.06	0.33	2
Solución B	0.17	0.08	0.11	0.36	1
Solución C	0.08	0.06	0.17	0.31	3

3.5.3. Módulo 3. Potencia

Tabla 14: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 3

Criterio	Costo	Funcionamiento	Modularidad	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Funcionamiento	0	-	1	2	0.33
Modularidad	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Puente H con componentes discretos
- Solución B: Puente H circuito integrado
- Solución C: Control con optoacopladores

Tabla 15: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 3

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0.5	1	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 16: Ponderación de funcionamiento para las alternativas de diseño módulo 3

Funcionamiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	0	1.5	0.25
Solución B	0.5	-	0	1.5	0.25
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

Tabla 17: Ponderación de modularidad para las alternativas de diseño módulo 3

Modularidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	0	1.5	0.25
Solución B	0.5	-	0	1.5	0.25
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

Tabla 18: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 3

	Costo	Funcionamiento	Modularidad	Σ	Orden de selección
Solución A	0.21	0.08	0.04	0.33	2
Solución B	0.08	0.08	0.04	0.21	3
Solución C	0.21	0.17	0.08	0.46	1

3.5.4. Módulo 4. Energético

Tabla 19: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 4

Criterio	Costo	Implementación	Tamaño	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Implementación	0	-	0	1	0.17
Tamaño	0	1	-	2	0.33
			Suma	6	1

- Solución A: Celda Solar

- Solución B: Alternador
- Solución C: Batería

Tabla 20: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 4

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

Tabla 21: Ponderación de implementación para las alternativas de diseño módulo 4

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	0	1.5	0.25
Solución B	0.5	-	0	1.5	0.25
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

Tabla 22: Ponderación de tamaño para las alternativas de diseño al módulo 4

Tamaño	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.5	0.42
			Suma	6	1

Tabla 23: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 4

	Costo	Implementación	Tamaño	Σ	Orden de selección
Solución A	0.08	0.04	0.06	0.18	3
Solución B	0.17	0.04	0.14	0.35	2
Solución C	0.25	0.08	0.14	0.47	1

3.5.5. Módulo 5. Navegación reactiva

Tabla 24: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 5

Criterio	Costo	Precisión	Robustez	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Precisión	0	-	0.5	1.5	0.25
Robustez	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

- Solución A: Lidar
- Solución B: Sonar
- Solución C: Cámara de vídeo

Tabla 25: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 5

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0.5	1.5	0.25
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0.5	0	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

Tabla 26: Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 5

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	0.5	2	0.33
Solución B	0.5	-	0.5	2	0.33
Solución C	0.5	0.5	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 27: Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 5

Robustez	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 28: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 5

	Costo	Precisión	Robustez	Σ	Orden de selección
Solución A	0.13	0.08	0.04	0.25	3
Solución B	0.25	0.08	0.13	0.46	1
Solución C	0.13	0.08	0.08	0.29	2

3.5.6. Módulo 6. Odometría

Tabla 29: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 6

Criterio	Costo	Precisión	Robustez	$\sum +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Precisión	0	-	1	2	0.33
Robustez	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Encoder con giroscopio
- Solución B: Sensor de desplazamiento óptico

Tabla 30: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 6

Costo	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1.5	0.50
Solución B	0.5	-	1.5	0.50
		Suma	3	1

Tabla 31: Ponderación de precisión para las alternativas de diseño al módulo 6

Precisión	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 32: Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 6

Robustez	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 33: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 6

	Costo	Precisión	Robustez	\sum	Orden de selección
Solución A	0.25	0.28	0.11	0.58	1
Solución B	0.25	0.11	0.06	0.42	2

3.5.7. Módulo 7. Adquisición y mando

Tabla 34: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 7

Criterio	Costo	Disponibilidad	Programación	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Disponibilidad	0	-	1	2	0.33
Programación	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Raspberry
- Solución B: Arduino
- Solución C: BeagleBone

Tabla 35: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 7

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 36: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 7

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Tabla 37: Ponderación de programación para las alternativas de diseño al módulo 7

Programación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	1	0	-	2	0.33
			Suma	6	1

Tabla 38: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 7

	Costo	Disponibilidad	Programación	Σ	Orden de selección
Solución A	0.17	0.14	0.03	0.33	2
Solución B	0.25	0.14	0.08	0.47	1
Solución C	0.08	0.06	0.06	0.19	3

3.5.8. Módulo 8. Visión

Tabla 39: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 8

Criterio	Costo	Disponibilidad	Robustez	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Disponibilidad	0	-	1	2	0.33
Robustez	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Kinect
- Solución B: Xtion

Tabla 40: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 8

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 41: Ponderación de disponibilidad para las alternativas de diseño al módulo 8

Disponibilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 42: Ponderación de robustez para las alternativas de diseño al módulo 8

Robustez	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1.5	0.50
Solución B	0.5	-	1.5	0.50
		Suma	3	1

Tabla 43: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 8

	Costo	Disponibilidad	Robustez	Σ	Orden de selección
Solución A	0.33	0.22	0.08	0.64	1
Solución B	0.17	0.11	0.08	0.36	2

3.5.9. Módulo 9. Control

Tabla 44: Ponderación de criterios de evaluación para el módulo 9

Criterio	Costo	Programación	Información	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo	-	1	1	3	0.50
Programación	0	-	1	2	0.33
Información	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

- Solución A: Matlab
- Solución B: Sistema operativo robótico (ROS)

Tabla 45: Ponderación de costo para las alternativas de diseño al módulo 9

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
		Suma	3	1

Tabla 46: Ponderación de programación para las alternativas de diseño al módulo 9

Programación	Solución A	Solución B	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Suma	3	1

Tabla 47: Ponderación de información para las alternativas de diseño al módulo 9

Información	Solución A	Solución B	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1.5	0.50
Solución B	0.5	-	1.5	0.50
		Suma	3	1

Tabla 48: Conclusión en la selección de alternativa de diseño al módulo 9

	Costo	Programación	Información	Σ	Orden de selección
Solución A	0.17	0.22	0.08	0.47	2
Solución B	0.33	0.11	0.08	0.53	1

3.6. Definición del diseño

En la tabla 49 se muestran las alternativas seleccionadas. Dichas soluciones serán implementadas en cada módulo.

Tabla 49: Componentes seleccionados

Módulo	Definición	Selección
Módulo 1	Base	Desplazamiento diferencial
Módulo 2	Tracción	Motor paso a paso
Módulo 3	Potencia	Control con optoacopladores
Módulo 4	Energético	Batería
Módulo 5	Navegación reactiva	Sonar
Módulo 6	Odometría	Encoder y giroscopio
Módulo 7	Adquisición y mando	Arduino
Módulo 8	Visión	Kinect
Módulo 9	Control	Sistema Operativo Robótico (ROS)

3.6.1. Módulo 1. Base

La alternativa de diseño seleccionada plantea un modelo de desplazamiento diferencial. La figura 30 muestra un modelo CAD donde se han posicionado las ruedas motoras al lado izquierdo y derecho de la plataforma robótica móvil. También, se evidencia la presencia de las ruedas seguidoras en la parte delantera y trasera.

La manufactura de la base implica instalar los motores y sobre todo las ruedas motrices en las posiciones establecidas en el modelado CAD con el menor error posible, a fin de evitar desequilibrios en el movimiento frontal del autómata. También, estas ruedas motrices deben ser ligeras, pero con un labrado capaz de adherirse a cualquier superficie.

De la misma manera, las ruedas seguidoras deben permitir un rápido desplazamiento de la plataforma con una fácil orientación, por ello se ha seleccionado las ruedas de castor. Este elemento también deben servir como punto de apoyo del autómata, equilibrando el sistema y evitando caer en puntos ciegos de desplazamiento.

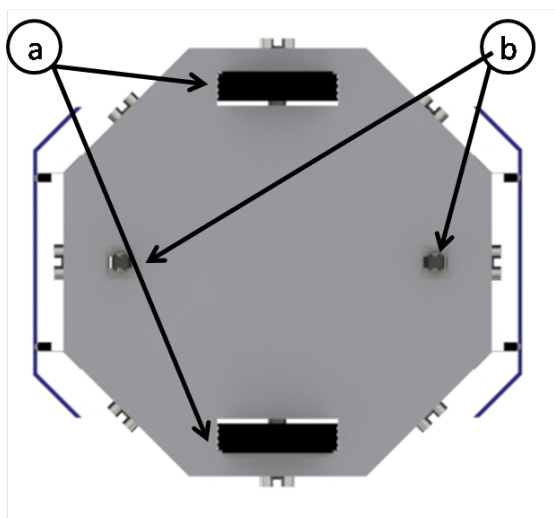


Figura 30: Posicionamiento de las ruedas. a) motoras y b) seguidoras

3.6.2. Módulo 2. Tracción

El módulo de tracción implica los motores que entregan el torque necesario para que la plataforma realiza los movimientos de desplazamiento. La selección de la alternativa de diseño menciona a los motores a pasos como la mejor opción a ser implementada.

En el diseño de una plataforma robótica móvil, la selección del actuador del robot es un elemento fundamental para el buen funcionamiento del mismo. Debido a que el autómata debe desplazarse por una superficie, los motores deben producir el torque suficiente para superar las imperfecciones del terreno, así como la fricción de la rueda con la superficie. También, se debe considerar que la superficie donde se desplaza el robot móvil puede tener algún grado de inclinación θ .

El correcto dimensionamiento de motor empieza por establecer las cargas en estado de reposo que afectan al comportamiento del motor. La figura 31 nos muestra estas cargas para un caso de rueda que pretende desplazarse sobre un plano inclinado.

En la figura 31 se muestra como el peso del robot se descompone en dos magnitudes correspondientes a los ejes coordenados del plano inclinado. Así tenemos:

$$m \cdot g_x = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (3.1)$$

$$m \cdot g_y = m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (3.2)$$

Donde m es la masa, g_x y g_y son las componentes de la gravedad g en los ejes x e y respectivamente.

Además, para que el robot no se deslice por la superficie inclinada, debe existir la

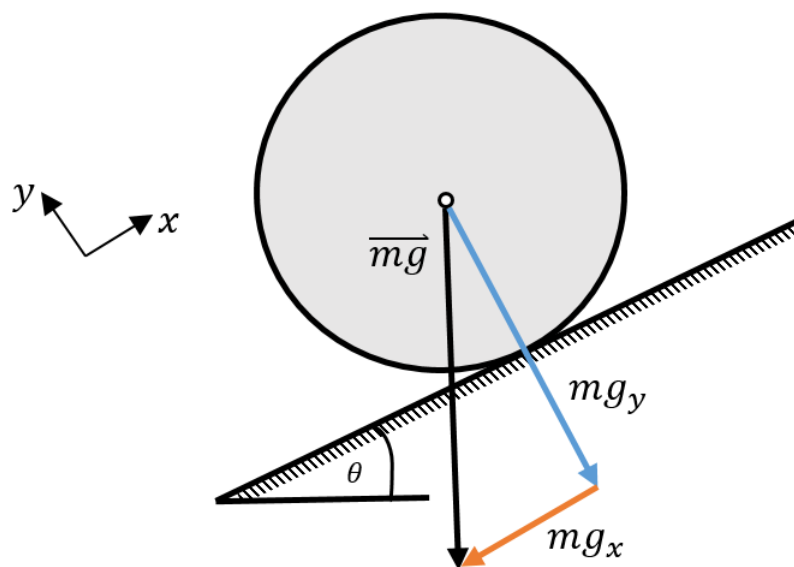


Figura 31: Cargas en reposo sobre una rueda motorizada

fuerza de fricción entre la rueda y dicha superficie. Dicha relación se expresa:

$$f = u \cdot N \quad (3.3)$$

Donde f es la fuerza de rozamiento, u es el coeficiente de fricción y N es la fuerza normal o reacción que se produce al poner en contacto dos superficies. La fuerza de rozamiento es el componente energético que debe ser vencida por el torque del motor. La figura 32 nos muestra estas fuerzas sobre el caso de la rueda que pretende desplazarse sobre un plano inclinado.

Finalmente, la sumatoria de momentos respecto al centro de la rueda no permite establecer la siguiente relación:

$$T = f \cdot R \quad (3.4)$$

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

Hasta este punto ya se podría obtener el torque del motor necesario para mantener el movimiento una vez iniciado el proceso de desplazamiento. Sin embargo, para el correcto dimensionamiento del motor hay que considerar un caso más extremo. Es así que se puede tener un estado estacionario de la rueda y pretender empezar el movimiento. Físicamente, este concepto implica tener una aceleración a . La figura 33 presenta la adición de este nuevo componente.

Conociendo esto se pueden igualar las fuerzas en el eje x . Así tenemos:

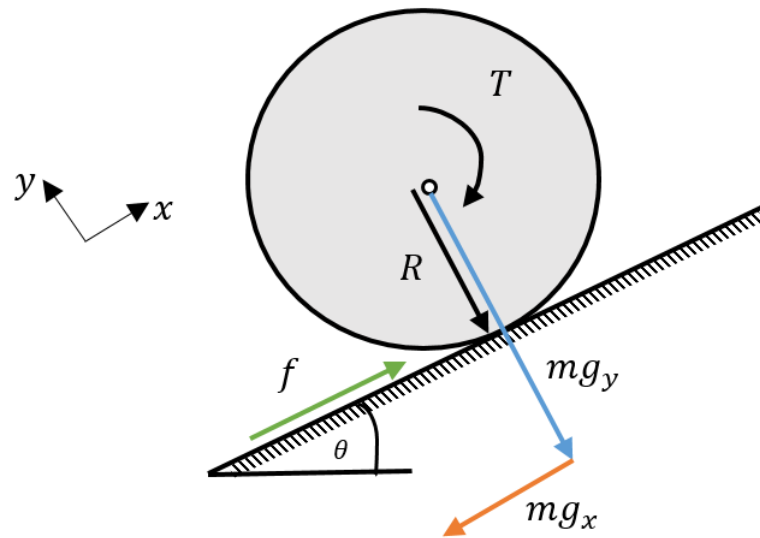


Figura 32: Cargas presentes en el desplazamiento de una rueda motorizada

$$\sum F_x = m \cdot a = m \cdot g_x + f \quad (3.5)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.1 y 3.4 tenemos:

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin(\theta) + \frac{T}{R} \quad (3.6)$$

Despejando la ecuación 3.6 se obtiene:

$$T = [a + g \cdot \sin(\theta)] \cdot m \cdot R \quad (3.7)$$

La ecuación 3.7 representa el torque necesario para que el robot avance por una pendiente con velocidad variable utilizando únicamente un motor. El diseño propuesto utiliza dos motores en configuración diferencial, esto implica dividir la expresión 3.7 para dos. Así tenemos:

$$T_m = \frac{T}{2} = \frac{[a + g \cdot \sin(\theta)] \cdot m \cdot R}{2} \quad (3.8)$$

Finalmente, hay que considerar la eficiencia de del motor y el factor de seguridad. Con estas nuevas variables obtenemos:

$$T_{fm} = fs \cdot \left(\frac{100}{e} \right) \left\{ \frac{[a + g \cdot \sin(\theta)] \cdot m \cdot R}{2} \right\} \quad (3.9)$$

Donde T_{fm} es el torque final del motor, fs es el factor de seguridad y e es la eficiencia del motor.

La ecuación 3.9 nos muestra el modelo matemático requerido para el dimensiona-

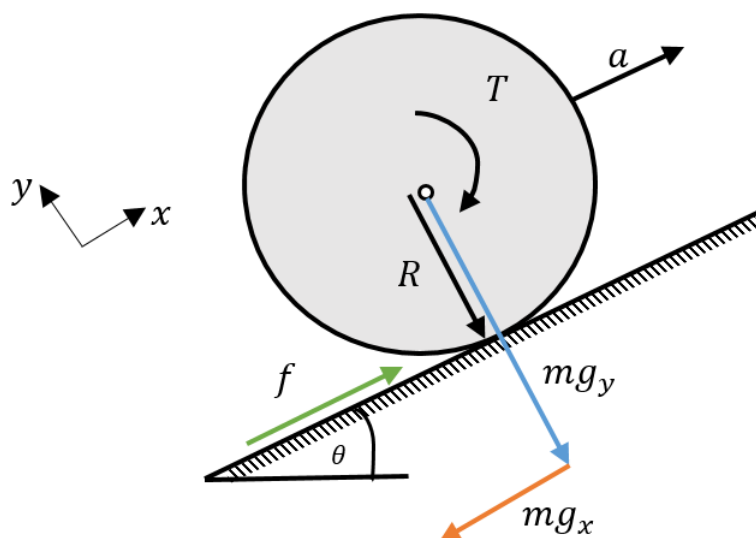


Figura 33: Cargas presentes en el desplazamiento desde el reposo de una rueda motrizada

miento de motores de plataformas robóticas móviles. Para obtener un valor numérico se utiliza los siguientes valores: $m_{max} = 10\text{kg}$, $R = 0,15\text{m}$, $\theta = 15^\circ$, $a = 0,1\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $e = 90\%$, $f_s = 2$. Estos parámetros concuerdan con las requisitos establecidos en la sección 3.2.

Reemplazando en la ecuación 3.9 tenemos:

$$T_{fm} = 2 \left(\frac{100}{90} \right) \left\{ \frac{[0,1 + 9,8 \cdot \sin(15^\circ)] (10) (0,15)}{2} \right\} = 2,1992\text{Nm} \approx 2,2\text{Nm} \quad (3.10)$$

Como se evidencia en la ecuación 3.10 el torque de cada motor requerido para el desplazamiento de la plataforma robótica móvil en el caso más extremo es $2,2\text{Nm}$. Con esta información, sumado a la disponibilidad en el mercado, se selecciona dos motores a pasos Wantai 57BYGH115-003B. La tabla 50 muestra las principales características del motor seleccionado.

3.6.3. Módulo 3. Potencia

El circuito de control con optoacopladores es la mejor alternativa de diseño según la correspondiente evaluación. Los sistemas embebidos existentes en el mercado reduce el tiempo de manufactura de estos componentes y aumentan notablemente la robustez de los circuitos eléctricos y electrónicos. Debido a esto, se considera incorporar un circuito de potencia embebido basado en control por optoacopladores para el mando de los motores a pasos.

Tabla 50: Características motor a pasos Wantai 57BYGH115-003B

Característica	Magnitud (Unidad)
Dimensiones	$115 \times 56,4 \times 56,4 \text{ mm}$
Peso	$1,55 \text{ Kg}$
Torque nominal	$2,45 \text{ N} \cdot \text{m}$
Voltaje de operación	$6,3 \text{ a } 30 \text{ V}$
Corriente máxima	3 A
Rango de temperatura	$-20 \text{ a } 50 \text{ }^\circ\text{C}$

[Wantai Electrical, 2015a]

El dimensionamiento de estos controladores debe partir de las características operativas de los motores. Así, en la tabla 50 se presenta parámetros eléctricos que el motor a pasos seleccionado puede llegar a requerir. El límite máximo de corriente que debe manejar el controlador del motor a pasos debe ser de 3 A y sus voltajes de operación deben oscilar entre $6,3 \text{ a } 30 \text{ V}$. Otro aspecto a mencionar dentro de la selección del controlador es el hecho de que este dispositivo estará trabajando en un ambiente con indicadores de humedad y gases combustibles que no afectan en su operación.

El motor seleccionado tiene pasos de $1,8^\circ$ lo que supone el uso de 200 pulsos para conseguir una vuelta del rotor. Si a esto le agregamos el hecho de que la velocidad de giro del rotor es $3,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, se determina que se requieren de 5800 pulsos por segundo para conseguir dicha velocidad. Este factor debe ser considerado para la selección del controlador pues una resolución que no abarque dicha expresión puede generar errores dentro del funcionamiento.

Finalmente, con la consideración de los diferentes aspectos mencionados, sumados a la disponibilidad en el mercado y el precio del dispositivo se decide colocar los controladores para motores a pasos Wantai DQ542MA. La tabla 51 muestra las principales características del controlador seleccionado.

Tabla 51: Características controlador de motor a pasos Wantai DQ542MA

Característica	Magnitud (Unidad)
Peso	$0,2 \text{ Kg}$
Voltaje de operación	$18 \text{ a } 50 \text{ V}$
Corriente de operación	$1 \text{ a } 4,2 \text{ A}$
Rango de temperatura	$-10 \text{ a } 45 \text{ }^\circ\text{C}$

[Wantai Electrical, 2015b]

3.6.4. Módulo 4. Energético

La alternativa de diseño seleccionada indica que la mejor opción para este módulo es la implementación de una batería. Con este antecedente, se procede a desarrollar un adecuado dimensionamiento de las baterías.

La selección de las baterías establece una relación entre la potencia mecánica del motor en el caso más exigente y la potencia eléctrica con las variables establecidas por el controlador y el motor (véase ecuación 3.11).

$$T \times \omega = I \times V \quad (3.11)$$

Donde T es el torque, ω es la velocidad angular, I es la intensidad de corriente y V es el voltaje de operación en voltios. Consideramos que el torque máximo del motor es de $2,45 Nm$, la velocidad angular del rotor es de $3,5 \frac{rad}{s}$ y el voltaje de operación de los controladores estandarizado para aplicaciones de este tipo es de $24 V$. En la ecuación 3.11 se presenta una expresión que tiene como única incógnita la corriente de operación requerida para el adecuado movimiento de la plataforma robótica móvil

$$I = \frac{T \times \omega}{V} = \frac{2,45 \times 3,5}{24} = 0,30544 A \quad (3.12)$$

La ecuación 3.12 nos indica que la corriente requerida por cada motor es aproximadamente de $0,30 A$, lo que sugiere que este valor debe multiplicarse por el número de motores utilizados. De esta manera tenemos que la corriente que debe ser suministrada por la fuente es de $0,60 A$. Sin embargo, los motores utilizados tienen un límite de corriente de $3 A$ y al utilizar la corriente calculada en la ecuación 3.12 se estaría desperdiciando la capacidad energética de los motores. Por ello, se dispone a utilizar este último valor para el dimensionamiento de las baterías. Entonces, considerando el argumento del número de motores, se tiene que la fuente debe suministrar un valor de $6 A$.

La capacidad de una batería está determinado por la intensidad de corriente capaz de suministrar en un tiempo establecido. La ecuación 3.13 nos muestra la magnitud correspondiente a la capacidad de la batería.

$$c = I \times t = 6 \times 1 = 6 Ah \quad (3.13)$$

Donde c es la capacidad de la batería, I la intensidad de corriente y t el tiempo de operación que para esta aplicación se estableció el valor de 1 hora. El valor determinado en la 3.13 debe ser multiplicado por dos valores:

- El primero corresponde al factor de carga fc , el cual establece que la capacidad

de una batería debe ser de 1.2 veces el valor dimensionado para evitar que las caídas de tensiones, debido a la descarga de las baterías, no afecten el funcionamiento. [Veiga et al., 2012]

- El segundo corresponde al factor de seguridad f_z , el cual permite omitir errores en el proceso de dimensionamiento. Para el caso de las baterías el valor recomendado es de 1.1 veces el valor dimensionado. [Veiga et al., 2012]

Así, la ecuación nos presenta la capacidad de corriente por hora de la fuente requerida para la operación de la plataforma robótica móvil.

$$c_{final} = c \times 1,2 \times 1,1 = 6,92 Ah \quad (3.14)$$

Otro aspecto que se debe considerar para la selección de la batería es el voltaje nominal, que para baterías de uso común es de 12V. Esto determina el uso de dos baterías conectadas en serie para alcanzar los 24V. Un requerimiento del circuito serie es que la corriente de las dos baterías debe ser igual para evitar daños en dichos componentes.

Con la información obtenida, solo resta seleccionar el tipo de baterías que se ajustan a los requerimientos de los motores y de la plataforma. Esta aplicación necesita una alta eficiencia, larga duración, alta densidad energética y seguridad [Veiga et al., 2012]. El tabla 52 muestra algunos tipos de celdas de batería, así como características que permiten justificar la selección hecha.

Tabla 52: Tipos de baterías y características

Batería	Unidad	PbSO ₂	Ni-Cd	Ni-Mh	LiFePO ₄
Energía por kilogramos	$\left[\frac{Wh}{kg}\right]$	30/40	40/60	30/80	100
Ciclos de uso		500/800	2000	1500	2000
Temperatura de operación	°C	-20/50	-40/60	-20/60	-20/60
Costo por kilovatio	$\left[\frac{\$}{kW}\right]$	150	400/800	250	400

[Veiga et al., 2012]

De acuerdo con la tabla 52 y considerando la disponibilidad en el mercado, así como el precio de este elemento, se decidió utilizar la batería de plomo - ácido Forza FUB-1270 cuyas principales características se muestran en el tabla 53.

Finalmente, hay que mencionar que las baterías no solo son fuente de energía para los controladores y motores, si no que también sirven para energizar los componentes de control y sensado. Estos componentes no requieren una corriente total superior a 0,1A, por lo que no afectan el cálculo realizado para la selección de las baterías. }

Tabla 53: Características de la Batería Forza FUB-1270

Característica	Magnitud (Unidad)
Voltaje	12 V
Capacidad de corriente	7 Ah
Duración de ciclo	20 horas
Ciclos de uso	300 ciclos

[Forza Power Technologies, 2015]

3.6.5. Módulo 5. Navegación reactiva

El módulo para navegación reactiva tiene como alternativa de diseño el uso de sensores ultrasónicos alrededor de la plataforma robótica móvil. Adicionalmente, se deben incorporar mecanismos parachoques que inhabiliten la operación del robot cuando choque contra algún obstáculo.

3.6.5.1. Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos de la plataforma robótica móvil cumple un rol semejante al ojo humano [Kim et al., 2007]. La capacidad de evitar obstáculos mientras el robot se desplaza a lo largo de un entorno cerrado es la principal aplicación de estos dispositivos. Además, los sensores ultrasónicos son un recurso económico que tiene una tasa relativamente alta de precisión y gran uso dentro de aplicaciones semejantes.

La distribución de los sensores ultrasónicos óptima sería de 24 sensores alrededor de la plataforma móvil, sin embargo el uso de este número de sensores genera repetitibilidad incongruente de las medidas [Kim & Kim, 2004]. Así, trabajos experimentales previos han determinado que el valor recomendado es de 8 a 12 sensores ultrasónicos ubicados alrededor del autómata. Así, se dispondrá de 8 sensores ultrasónicos HC-SR04 posicionados alrededor del autómata como se muestra en la figura 34. Las características técnicas de este dispositivo se muestran en la tabla 54.

Tabla 54: Características del sensor ultrasónico HC-SR04

Característica	Magnitud (Unidad)
Voltaje de operación	5 V
Corriente de operación	15 mA
Rango	2 a 400 cm
Angulo de percepción	15°

[Open Source Arduino, 2015]

3.6.5.2. Sensores de fin de carrera

El arreglo de sensores ultrasónicos es una buena herramienta para evitar obstáculos mientras se realiza el desplazamiento del autómata, sin embargo, al ser elementos electrónicos, no están exentos de fallas. Por ellos en el diseño de la plataforma robótica móvil se debe incorporar un sistema parachoques que al ser activado, inhabilite todas las funciones del autómata hasta que sea restaurado por un agente humano.

Como se muestra en la figura 34, se ha implementado dos mecanismos de parachoques en las dos direcciones principales, frente y reversa. Estos parachoques están diseñados a partir de interruptores denominados fin de carrera. Estos dispositivos son sensores primarios que conmutan de estado cuando se pulsa un botón integrado al dispositivo.

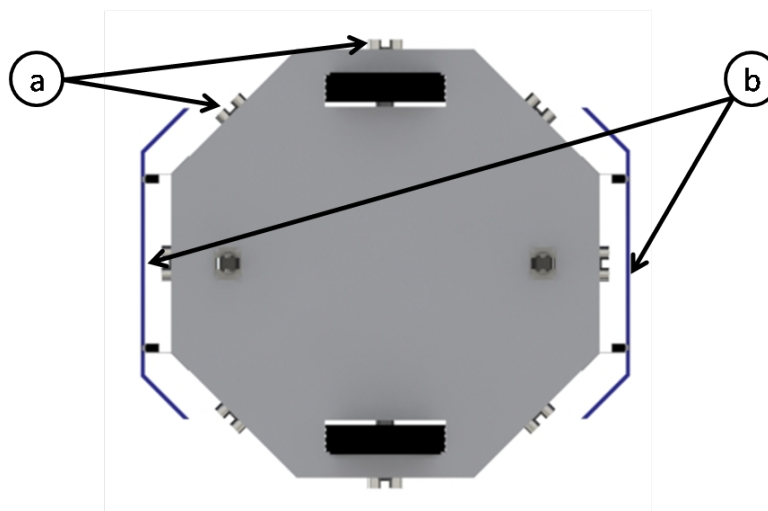


Figura 34: Posición de sensores. a) Ultrasónicos y b) Fin de carrera

En el diseño elaborado, se ha utilizado cuatro sensores de este tipo (dos por cada lado), con el fin de evitar un mal funcionamiento de los mecanismos parachoques. Es importante mencionar que estos dispositivos pueden funcionar con cualquier voltaje y prácticamente no requieren corriente.

3.6.6. Módulo 6. Odometría

El uso de encoder y giroscopio fue la propuesta que tuvo mayor ponderación en la selección de alternativa de diseño para el módulo de odometría. El encoder permitirá determinar el número de revoluciones, así como la velocidad de giro de los motores. Por su parte, el giroscopio determina los ángulos de orientación del robot.

3.6.6.1. Encoder

El encoder como definición, es un instrumento de medición que convierte la posición angular en una señal digital. Su principio de funcionamiento es entregar un pulso cada cierta variación angular.

El uso de motores a pasos requiere de una señal pulsante para que pueda realizar el movimiento rotatorio. Esta señal puede servir como parámetro de medición de la posición angular del eje del motor.

Para una mejor recolección de esta señal, es recomendable usar un sistema dedicado únicamente a la generación de pulsos. Este aspecto se detallará de mejor manera en la sección 3.6.7.2.

3.6.6.2. Giroscopio

El giroscopio es un dispositivo mecánico que sirve para medir la orientación en el espacio de un elemento. Esta propiedad es de mucha importancia en el diseño de la plataforma robótica móvil pues permite establecer diferencias angulares en la orientación entre las posiciones actual y objetivo. En otras palabras, ayuda al robot a saber que dirección debe tomar en su desplazamiento para alcanzar el objetivo establecido.

Para una mejor manipulación de esta señal, es recomendable la adquisición de un sistema embebido. Así, se ha seleccionado el giroscopio modular MPU-6050 cuyas características operativas son mostradas en la tabla 55.

Tabla 55: Características del sensor giroscopio MPU-6050

Característica	Magnitud (Unidad)
Voltaje de operación	5V
Corriente de operación	3,6mA
Rango	2000 $\frac{^{\circ}}{s}$

[Open Source Arduino, 2015]

3.6.7. Módulo 7. Adquisición y mando

La propuesta con mayor ponderación en la selección de alternativa para el módulo de adquisición y mando es el uso del sistema embebido Arduino. Esta herramienta electrónica permite recolectar información de los sensores, controlar el movimiento de la plataforma robótica móvil y comunicarse con el módulo de control que se encargará de realizar localización y mapeo simultáneos. La tabla 56 muestra los modelos más usados de Arduino.

Tabla 56: Tabla comparativa de los principales sistemas embebidos Arduino

Modelo	Voltaje	E/S Digitales	E/S Análogas	Memoria	Tipo USB
Uno	5 – 12 V	14	6	32 KB	USB B
Leonardo	5 – 12 V	20	12	32 KB	Micro USB
Mega 2560	5 – 12 V	54	16	256 KB	USB B
Micro	5 – 9 V	20	12	32 KB	Micro USB
Nano	5 – 9 V	14	8	32 KB	Micro USB

[Open Source Arduino, 2015]

3.6.7.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se debe considerar el número de sensores utilizados en el diseño de la plataforma robótica móvil. La tabla 57 muestra el detalle de los sensores usados, el número de pines requeridos y el tipo de entrada.

Tabla 57: Detalle de sensores usados en el diseño de la plataforma robótica móvil

Sensor	Cantidad	Pines requeridos	A/D
Ultrasónico	8	16	D
Fin de carrera	4	4	D
Encoder	2	2	D
Giroscopio	1	6	A

Como se evidencia en la tabla 57, se requiere de 22 pines digitales y 6 pines análogos. El detalle comparativo de la tabla 56, sumados a la disponibilidad de mercado, nos permite determinar que la tarjeta Arduino Mega 2560 es la mejor opción para realizar la adquisición de datos. Además, al poseer cuatro unidades de comunicación serial, puede servir para intercambiar información entre el módulo de control y con el mando de actuadores.

3.6.7.2. Mando de actuadores

El sentido de giro de las ruedas motrices estará gobernado por la tarjeta Arduino Mega 2560. Sin embargo, el gran número de líneas de código de programación provoca un retardo en los pulsos por segundo que entrega dicha tarjeta a los controladores de los motores a pasos. Esto causa que la velocidad angular de las ruedas disminuya y con ellos la velocidad lineal de la plataforma robótica móvil.

Para solucionar este inconveniente, se decide incorporar la tarjeta Arduino Nano, la misma que únicamente efectuará el trabajo de entregar los pulsos requeridos al controlador del motor. También, intercambiará, vía serial con la tarjeta Arduino Mega 2560, el dato de cantidad de pulsos, mismo que servirá para hacer las veces de encoder.

3.6.8. Módulo 8. Visión

El sistema de visión Kinect fue la propuesta con más ponderación en la selección de diseño de alternativa. Esta herramienta debe ser posicionada sobre la plataforma robótica móvil con el propósito de apoyar en la localización y mapeo simultáneos. La capacidad de percepción de Kinect en escala de grises es la que le permite generar mapas al módulo de control.

3.6.9. Módulo 9. Control

Este módulo es el encargado de la operatividad de la plataforma robótica móvil. La propuesta que resultó de la evaluación de alternativas de diseño fue el sistema operativo robótico. ROS es una herramienta informática que funciona en distribuciones de Linux, lo que implica la incorporación de un computador para el funcionamiento del robot.

3.6.9.1. Estructura de control de la plataforma robótica móvil

El uso de ROS involucra el desarrollo de nodos que deben estar acorde con las necesidades de la plataforma robótica móvil, así como con los módulos descritos previamente. Estos nodos, descritos en la tabla 58, deben estar jerarquizados a fin de conseguir un adecuado desenvolvimiento del robot. La figura 35 muestra como se ha integrado los nodos dentro de ROS.

Tabla 58: Nodos desarrollados en ROS

#	Nodo	Módulo relacionado
1	Navegación reactiva	Navegación reactiva
2	Operación remota	-
3	SLAM	-
4	Odometría	Odometría
5	Visión	Visión
6	Control de motores	Tracción

3.6.9.2. Nodo 1. Navegación reactiva

Este nodo está posicionado a la cabeza del esquema de la figura 35, pues la plataforma robótica móvil debe evitar los obstáculos durante el movimiento. Esto se logra al usar un algoritmo que bloquee las direcciones que están obstruidas, dejando como única salida las direcciones que no tienen algún objeto en frente.

El nodo de navegación reactiva en el sistema operativo robótico adquiere información de la distribución octogonal de sensores ultrasónicos a través del módulo de

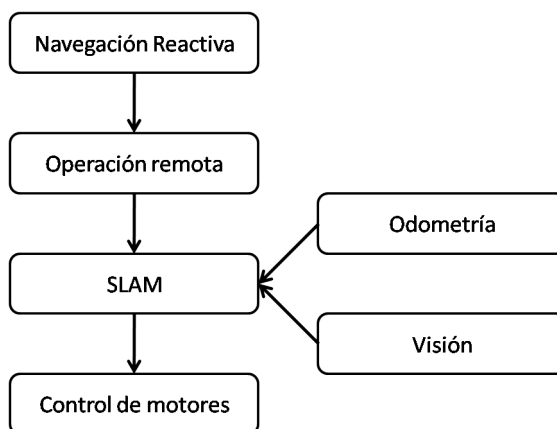


Figura 35: Jerarquía de nodos en ROS

adquisición y mando. Esta información es recibida como un vector e introducida al nodo que se encarga de procesar y determinar las direcciones hábiles para después presentarlas como un mensaje. El mensaje se actualiza cada vez que el robot toma una nueva orientación.

3.6.9.3. Nodo 2. Operación remota

Para la operación remota se ha utilizado un joystick conectado vía inalámbrica/USB. A través del joystick se pueden controlar los movimientos de la plataforma, así como transmitirle información de la velocidad de las ruedas. El control del joystick se lo realiza por medio de un nodo en ROS. El nodo imprime un mensaje, el cual es un arreglo de valores tanto de botones como ejes. El mensaje se actualiza cada vez que el joystick es presionado.

3.6.9.4. Nodo 3. SLAM

El nodo de SLAM es el encargado de crear la autonomía de la plataforma robótica móvil. En él convergen los nodos de odometría y visión, pues su funcionamiento requiere la información de estos nodos. Además, los movimientos entregados al nodo de control de motores están restringidos por los nodos de navegación reactiva y operación remota.

3.6.9.5. Nodo 4. Odometría

El nodo de odometría sirve de ayuda en el desplazamiento de la plataforma. Recibe como un mensaje la información recolectada de los encoders y giroscopio. El mensaje es constantemente actualizado con el fin de determinar posición y orientación del autómata en tiempo real.

3.6.9.6. Nodo 5. Visión

El nodo de visión permite establecer comunicación entre la cámara Kinect y el sistema operativo robótico. Posterior a esto, el algoritmo permite el intercambio de información entre el nodo de SLAM y el de visión con el fin de poder crear mapas. Adicionalmente, este nodo asiste en la navegación de la plataforma.

3.6.9.7. Nodo 6. Control de motores

Este nodo es el último de la cadena de jerarquías mostrada en la figura 35. Recibe como mensaje datos de velocidad lineal y velocidad angular, los mismos que son producto del procesamiento de los nodos descritos previamente. Este nodo a su vez, entrega un mensaje al módulo de adquisición y datos, el cual se encarga de procesarlo y convertirlo en señales convenientes para el control de los motores.

3.6.9.8. Modelo cinemático de la plataforma robótica móvil

Para el control de los motores de la plataforma robótica móvil, se debe considerar el modelo cinemático. El mismo que parte del modelo diferencial de desplazamiento.

Como punto inicial se debe definir del vector posición del robot en el plano global como se muestra en la ecuación 3.15.

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Donde x_1 , y_1 son las coordenadas de la posición actual del robot y θ es la orientación actual del robot vistas desde un punto de referencia. Este último valor sirve para determinar la matriz ortogonal de rotación presentada en la ecuación 3.16.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Posterior a esto, se debe determinar la velocidad angular de las ruedas izquierda (véase ecuación 3.17) y derecha (véase ecuación 3.18), basados en la información del diseño de la plataforma robótica móvil.

$$\omega_1 = \frac{r \cdot \Phi_1}{2 \cdot l} = \frac{0,1525 \cdot \Phi_1}{2 \cdot 0,2} = 0,38125 \cdot \Phi_1 \quad (3.17)$$

$$\omega_2 = -\frac{r \cdot \Phi_2}{2 \cdot l} = -\frac{0,1525 \cdot \Phi_2}{2 \cdot 0,2} = -0,38125 \cdot \Phi_2 \quad (3.18)$$

Donde r es el radio de la rueda en metros, l es la distancia entre la rueda y el origen del robot, Φ_1 y Φ_2 es la velocidad angular del motor.

Luego, se detalla la velocidad lineal de las ruedas izquierda (véase ecuación 3.19) y derecha (véase ecuación 3.20).

$$v_1 = \frac{r \cdot \Phi_1}{2} = \frac{0,1525 \cdot \Phi_1}{2} = 0,07625 \cdot \Phi_1 \quad (3.19)$$

$$v_2 = \frac{r \cdot \Phi_2}{2} = \frac{0,1525 \cdot \Phi_2}{2} = 0,07625 \cdot \Phi_2 \quad (3.20)$$

Una vez determinado velocidades angulares y lineales, se procede a generar un vector que represente la nueva posición del robot en un determinado tiempo. El vector es mostrado en la ecuación 3.21.

$$\begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ D\theta \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} v_1+v_2 \\ 0 \\ \omega_1+\omega_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Posterior a esto, se deben definir la distancia (véase ecuación 3.22), así como el ángulo (véase ecuación 3.23) que existen entre las posiciones actual y final. Además, se debe definir la velocidad lineal del robot (véase ecuación 3.24).

$$\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.22)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right] \quad (3.23)$$

$$v = \sqrt{Dx^2 + Dy^2} \quad (3.24)$$

Con estos valores se obtiene el vector posición final. Dicho vector es mostrado en la ecuación 3.25.

$$\begin{bmatrix} D\rho \\ D\alpha \\ D\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha) & 0 \\ \frac{\sin(\alpha)}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin(\alpha)}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ D\theta \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

El último vector definido, sirve de apoyo para determinar las velocidades angulares de los motores a cada instante, es decir, es un valor numérico que se actualiza

constantemente. Así, la ecuación 3.26 nos presenta la relación entre este último vector y la matriz ortogonal de rotación.

$$\begin{bmatrix} v_i \\ a \\ \omega_i \end{bmatrix} = R(\theta) \cdot \begin{bmatrix} D\rho \\ D\alpha \\ D\beta \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Finalmente, se determina las velocidades angulares de la rueda izquierda (véase ecuación 3.27) y de la rueda derecha (véase ecuación 2.28).

$$\Phi_{1i} = \frac{v_i + l \cdot \omega_i}{r} = \frac{v_i + 0,2 \cdot \omega_i}{0,1525} \quad (3.27)$$

$$\Phi_{2i} = \frac{v_i - l \cdot \omega_i}{r} = \frac{v_i - 0,2 \cdot \omega_i}{0,1525} \quad (3.28)$$

Cabe mencionar que estas ecuaciones deben ser incorporadas en el nodo de control de motores para lograr un manejo coherente de la plataforma robótica móvil.

3.6.10. Definición de concepto final

Uno de los principales factores a analizar dentro de la construcción de la plataforma robótica móvil es la facilidad de manufactura que deben tener los componentes del bastidor. Para el caso en particular, el bastidor consiste en una base octagonal cuyas dimensiones son establecidas en el plano mecánico (ver apéndice A). Además, la distribución de los componentes debe ser equilibrada sobre la superficie de forma que la base no pierda estabilidad cuando se encuentre operando. Finalmente, todos los mecanismos de sujeción de los componentes deben ser estandarizados a fin de ahorrar tiempo y recursos en el proceso de ensamble. La figura 36 junto con la tabla 59 detallan los componentes de la plataforma robótica móvil.

El bastidor no solo incluye en su interior los componentes primarios encargados del movimiento y sensado, además debe servir de soporte para los módulos de visión y control que apoyarán en la tarea de realizar el mapeo y la localización simultáneos.

En vista de que el módulo de control es un computador portátil, lo más adecuado es diseñar una plataforma donde se pueda asentar este equipo y que además comparta la forma octagonal del robot. Para el caso del módulo de visión, se requiere diseñar un soporte que vaya acorde con las dimensiones de sistema Kinect y que, además de ser funcional, sea estético. Así, la figura 37 nos muestra el modelo CAD de la plataforma robótica móvil añadiendo estos dos últimos componentes.

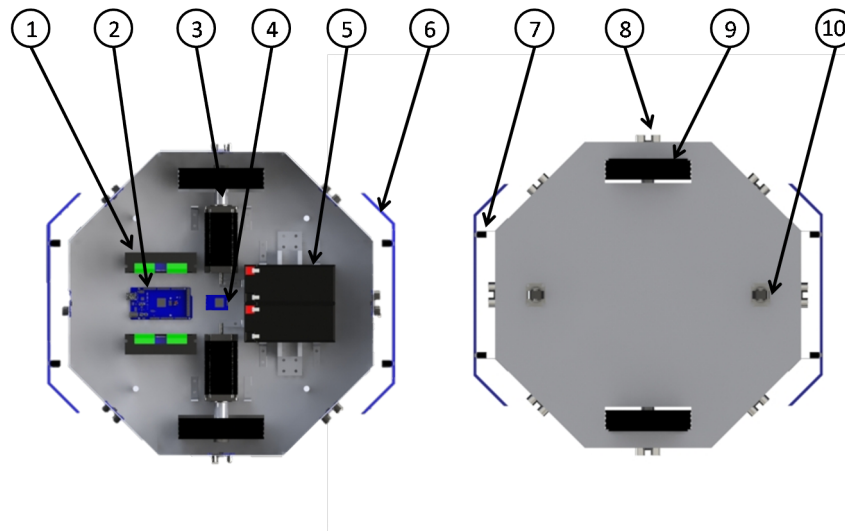


Figura 36: Modelo CAD de la plataforma robótica móvil

Tabla 59: Detalle de componentes de la plataforma robótica móvil

Número	Descripción del componente	Módulo
1	Controlador de motor	Potencia
2	Tarjetas Arduino	Adquisición y mando, odometría
3	Motor paso a paso	Tracción
4	Giroscopio	Odometría
5	Batería	Energético
6	Parachoques	Navegación reactiva
7	Fin de carrera	Navegación reactiva
8	Sensor ultrasónico	Navegación reactiva
9	Rueda motriz	Base
10	Rueda seguidora	Base

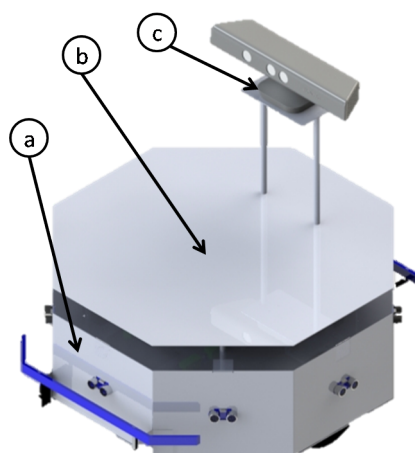


Figura 37: Modelo CAD de la plataforma robótica móvil. a) Módulo Base, b) Módulo de control y c) Módulo de visión Kinect

3.7. Resumen

- Las necesidades de diseño están enfocadas a obtener un balance entre los requerimientos y deseos de los usuarios y diseñadores. Así, los aspectos más influyentes en el desarrollo de la plataforma robótica móvil son: el diseño para interiores, la capacidad de realizar localización y mapeo simultáneos, navegación reactiva, el uso de tecnología de código abierto, economía, entre otros.
- Con las necesidades claramente establecidas se procede a definir métricas que aporten como objetivo a alcanzar por el diseño de la plataforma robótica móvil. Las métricas más importantes son las que corresponden a las necesidades más influyentes. Algunas especificaciones son: el tamaño y peso que debe tener la plataforma, la cantidad de componentes a usar, la inversión económica que requiere, entre otros.
- De acuerdo con el diseño concurrente, es recomendable crear módulos que abarquen una función específica. Estos módulos deben cumplir de forma particular con las especificaciones establecidas. Para este proyecto se desarrollaron los módulos: 1) base, 2) tracción, 3) potencia, 4) energético, 5) navegación reactiva, 6) odometría, 7) adquisición y mando, 8) visión y 9) control.
- Mediante el uso del método ordinal corregido de criterio ponderados se generan soluciones para los módulos establecidos anteriormente. De esta manera las soluciones más adecuadas para los módulos establecidos son: 1) base - mecanismo de desplazamiento diferencial, 2) Tracción - motores a pasos, 3) Potencia - circuito de control por optoacopladores, 4) Energético - baterías de plomo ácido, 12 voltios y 7Ah, 5) Navegación reactiva - Sensores ultrasónicos, 6) Odometría - Encoder con giroscopio, 7) Adquisición y mando - Sistemas embebidos Arduino, 8) Visión - Cámara Kinect y 9) Control - Sistema operativo robótico (ROS).
- Para un adecuado intercambio de información de los diferentes módulos, se deben crear nodos en ROS. Cada nodo recibe mensajes, procesan información y publican mensajes con los parámetros requeridos por otros nodos. Los nodos desarrollados para el control de la plataforma robótica móvil son: navegación reactiva, operación remota, SLAM, odometría, visión y control de motores. Estos nodos están dispuestos de forma jerárquica a fin de lograr un control óptimo de la plataforma robótica móvil.

Capítulo 4

Construcción y funcionamiento

El capítulo detalla el proceso de construcción de los elementos mecánicos, así como la instalación de componentes eléctricos y electrónicos que forman parte de la estructura física y operativa de la plataforma robótica móvil. También, se detalla los resultados obtenidos de la puesta en marcha del presente proyecto.

4.1. Construcción de la plataforma robótica móvil

La construcción de la plataforma robótica móvil debe seguir una secuencia que inicia en la manufactura de las piezas del bastidor y su posterior acople. Con la estructura armada, lo siguiente es instalar todos los componentes determinados en el capítulo de diseño, para luego realizar las conexiones entre dichos elementos.

4.1.1. Manufactura del bastidor

El bastidor fue elaborado en latón ASTM B147 de $1/32$ pulgadas de espesor, manufacturado en sus totalidad en el laboratorio de máquinas y herramientas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Los procesos realizados en la construcción del soporte incluyen corte, doblado, soldado, perforado, limado, entre otros. La figura 38 presenta imágenes sobre los procesos realizados en la manufactura del bastidor.

4.1.2. Instalación de componentes operativos

Una vez concebido las partes que forman el bastidor, se distribuye los componentes seleccionados para la operatividad de la plataforma robótica móvil. En esta etapa se corrigen posibles fallas de construcción y se estandariza los métodos de sujeción usando tornillos M5. La figura 39 muestra como se instalaron motores, controladores y baterías, así como los resultados finales de este proceso.



Figura 38: Manufactura del bastidor

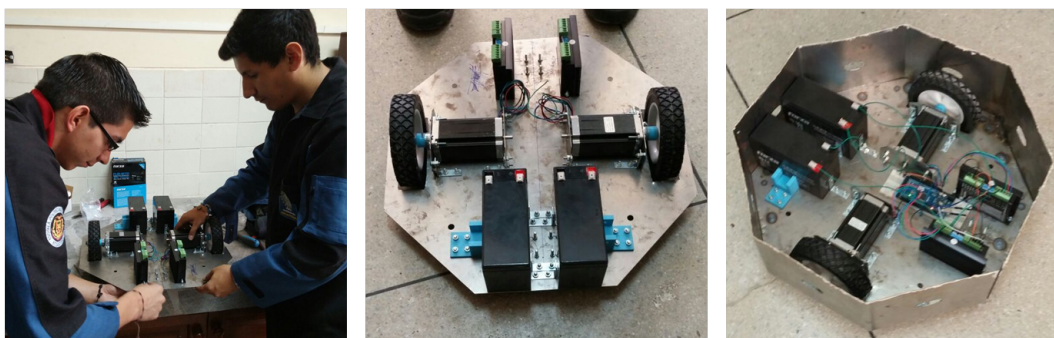


Figura 39: Instalación de motores, controladores y baterías

4.1.3. Instalación de sensores

Una vez pintada la estructura, se instala los sensores ultrasónicos, fines de carrera y giroscopio. También, se incorpora los sistemas embebidos Arduino y las placas de circuitos impresos. La figura 40 presenta el proceso de ubicación de estos componentes.

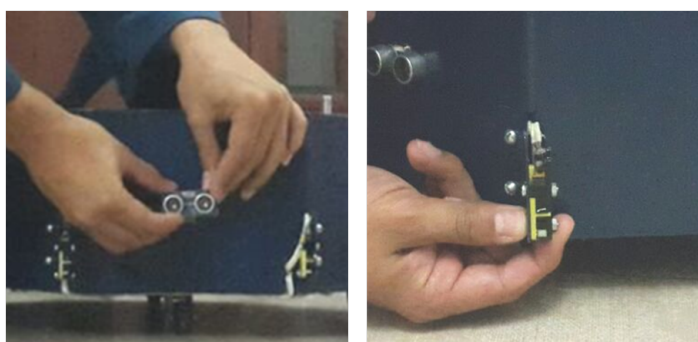


Figura 40: Instalación de sensores ultrasónicos y fin de carrera

4.1.4. Conexión de componentes

Con la instalación de todos los componentes se puede desarrollar el cableado. Las conexiones de la plataforma robótica móvil se pueden contemplar en la figura 41.

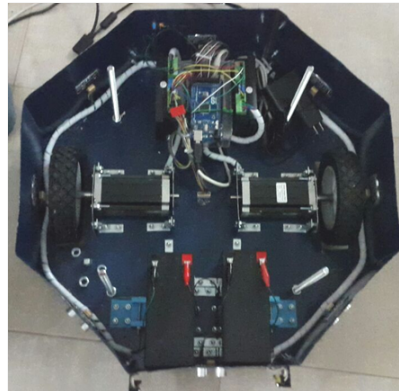


Figura 41: Conexión de componentes

4.1.5. Instalación de soportes

La plataforma robótica requiere de dos soportes para completar su construcción. El primero es que el sirve de base para el computador portátil que forma parte del módulo de control. Fue manufacturado en acrílico de 6 mm. El segundo soporte sirve para sostener al módulo de visión (cámara Kinect). Fue elaborado en acrílico de 4 mm. Ambos componentes fueron obtenidos por corte por láser. La figura 42 presenta el ensamble de estas dos piezas sobre la plataforma robótica móvil.



Figura 42: Instalación de soportes

4.1.6. Instalación de cámara Kinect

Finalmente, la cámara Kinect se incorpora a la plataforma robótica móvil como se muestra en la figura 43.

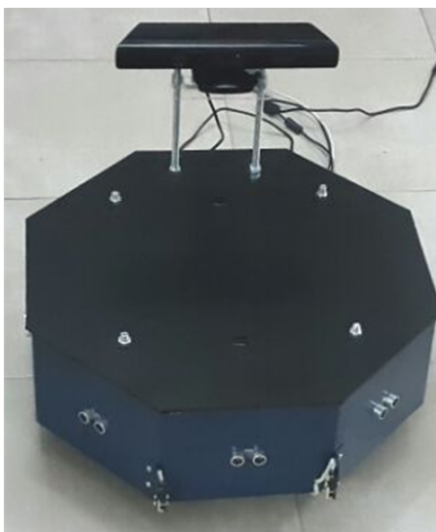


Figura 43: Instalación de cámara Kinect

4.2. Pruebas y funcionamiento

La implementación de la plataforma robótica móvil invita a realizar pruebas cada vez que se tenga un avance tanto en construcción como en desarrollo del control. Así, se evalúa el funcionamiento del robot en cinco etapas. La primera una vez finalizada la instalación de los componentes operativos, la segunda al alcanzar la teleoperación, la tercera cuando se adquiere los datos de odometría, la cuarta al incorporar navegación reactiva a los movimientos del robot y la última al completar localización y mapeo simultáneos.

4.2.1. Primera evaluación

La primera evaluación se realiza una vez implementado los componentes operativos de la plataforma robótica móvil. Es decir, esta prueba se efectúa cuando se han instalado motores, controladores, baterías y sistemas embebidos. El objetivo de esta evaluación es determinar si el robot móvil cumple con las características operativas del mecanismo de desplazamiento.

Las pruebas realizadas incluyen seguimiento de trayectoria abierta y cerrada. Un ejemplo de este proceso es mostrado <https://youtu.be/94xf77O5FPo>.

4.2.1.1. Resultados

Esta evaluación indica una leve desviación del robot al seguir la trayectoria. La solución a este problema es reducir ligeramente la tasa de pulsos que entrega el módulo de control al motor a pasos que se adelanta y genera dicho error.

Otro punto que se identifica es la presencia de puntos ciegos en los apoyos del robot. Este problema se elimina al reducir la altura de las ruedas seguidoras. La figura 44 ilustra sobre la modificación realizada.

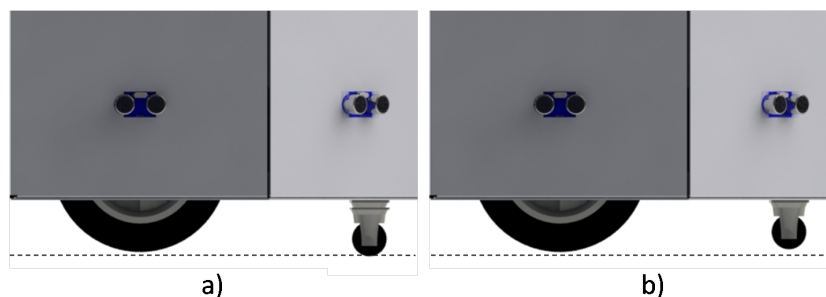


Figura 44: Corrección de la altura de ruedas seguidoras a) antes y b) después

4.2.2. Segunda evaluación

Esta evaluación se realiza al enlazar los nodos de teleoperación y de control de motores en ROS. Es decir, esta prueba se plantea cuando la plataforma robótica móvil puede ser comandada por un control remoto. El objetivo de esta evaluación es verificar la operatividad de ROS y de la comunicación entre sus nodos. También, permite identificar posibles errores tanto en la implementación del robot móvil como en el algoritmo de control del mando. La prueba se basa en el movimiento del robot a lo largo del laboratorio de procesos de manufactura.

También, pone a prueba el periodo operativo que puede tener la plataforma móvil. Dicho valor depende de la fuente de alimentación y del consumo los elementos eléctricos y electrónicos del robot móvil. En la sección de diseño se determinó que la capacidad de la batería sería de 7 Ah. El modelo seleccionado especifica que la duración de dicho componente es de 20 horas. Así, el proceso de verificación consiste en tomar por intervalos datos de voltaje y corriente de las baterías mientras el robot se encuentra operativo. Parte de la segunda evaluación se puede observar en <https://youtu.be/S58nWkPT7B8>.

4.2.2.1. Resultados

Los resultados de esta prueba presentan un control de la plataforma sin retardos, es decir, los comandos entregados desde el joystick son sentidos, procesados y enviados a los actuadores en tiempo real.

Por otro lado, los datos recolectados de voltaje y corriente, mostrados en la tabla 60, indican que el tiempo operativo de la plataforma robótica móvil es de aproximada-

mente 7 horas. Superado este tiempo, el robot pasa a estar inoperativo debido a que la etapa de potencia no funciona con menos de 18 V.

Tabla 60: Datos de corriente y voltaje durante la segunda evaluación

Intervalo	Corriente	Voltaje
0 : 00 h	4,92 A	24,37 V
1 : 00 h	5,01 A	23,97 V
2 : 00 h	5,38 A	22,27 V
3 : 00 h	5,59 A	21,45 V
4 : 00 h	5,95 A	20,14 V
5 : 00 h	6,12 A	19,59 V
6 : 00 h	6,55 A	18,31 V
7 : 00 h	-	17,53 V

La duración de las baterías no cumple con las especificaciones técnicas del fabricante, pero supera las expectativas de diseño de la plataforma robótica móvil.

4.2.3. Tercera evaluación

La tercera etapa de evaluación se realiza cuando los sensores que asisten al módulo de odometría se ha instalado. Se pone a prueba los datos adquiridos y se cuantifica cuan precisión son.

Para ello, se establece seis recorridos. La mitad de estos caminos son de trayectoria abiertas y los tres restantes trayectorias cerradas. Se midió el error obtenido en cada uno de ellos. Tal error es la diferencia entre el centro del robot móvil y el punto definido como destino. Escenas del proceso de validación de datos son mostrados en https://youtu.be/H2xOQFAC_1I.

4.2.3.1. Resultados

La evaluación de datos de la trayectoria abierta son mostrados en la tabla 61. mientras que los de trayectoria cerrada son mostrados en la tabla 62.

Tabla 61: Datos de desviación en trayectoria abierta

Recorrido	Desviación en x	Desviación en y
1	15,6 cm	3,3 cm
2	12,4 cm	3,7 cm
3	14,7 cm	2,9 cm
Promedio	14,2 cm	3,3 cm
Porcentaje	7,9 %	1,8 %

Tabla 62: Datos de desviación en trayectoria cerrada

Recorrido	Desviación en x	Desviación en y
1	47,3 <i>cm</i>	51,8 <i>cm</i>
2	53,1 <i>cm</i>	55,9 <i>cm</i>
3	43,4 <i>cm</i>	54,7 <i>cm</i>
Promedio	47,9 <i>cm</i>	54,1 <i>cm</i>
Porcentaje	26,6 %	30,1 %

Como se evidencia en las tablas, la odometría del robot presenta dos resultados contraproducentes. En trayectoria abierta da un valor de error relativamente bajo si se compara con su contra parte de trayectoria cerrada. Así se puede concluir que los resultados más realistas son los presentados en el segundo caso, pues el robot debe seguir trayectorias que distan mucho de la línea recta. A pesar del valor presentado, el error de odometría está dentro de los rangos aceptables para este tipo de medida [Chong & Kleeman, 1997].

4.2.4. Cuarta evaluación

Una vez desarrollado el nodo de navegación reactiva en ROS se puede realizar una cuarta evaluación donde se ponga a prueba el comportamiento de la plataforma robótica móvil restringido por los sensores ultrasónicos.

Para esta prueba se pone en marcha el control del robot mediante teleoperación. A lo largo el trayecto se establecen obstáculos estáticos y dinámicos. Un video con el modo operativo del robot es presentado en <https://youtu.be/ihNhUb48Z3s>.

4.2.4.1. Resultados

Los datos de navegación reactiva presenta dos errores significativos. El primero, a nivel de percepción, establece error en la medidas captadas por los sensores ultrasónicos debido a la posición y orientación. Esto se corrige al acomodar los sensores y mejorar su fijación. El segundo error, a nivel de programación, indica un retardo en los movimientos del robot debido al número de líneas que se deben agregar al algoritmo de control para la percepción de las distancias. Este error se corrige al agregar otro sistema embebido Arduino al módulo de adquisición y mando, mismo que se encarga de recolectar los datos del módulo de navegación reactiva y enviarlos a ROS.

También, se presenta puntos ciegos en la percepción de los sensores ultrasónicos. Este problema no dependen del sistema sensorial implementado, sino de la distribución de anillo usada y de la forma de los obstáculos. Es evidente que cuando ambos factores se juntan puede existir errores en la navegación reactiva.

4.2.5. Quinta evaluación

La última prueba se centra en la operatividad de la plataforma robótica móvil implementado la localización y mapeo simultáneos. El objetivo es evaluar la los movimientos del robot, la capacidad de construcción de mapas y la precisión de la ubicación del robot dentro del mapa creado. El robot es posicionado en un entorno cerrado y se pone en marcha la prueba. Algunos resultados de la evaluación son mostrados en <https://youtu.be/My82WjqGFt0>.

4.2.5.1. Resultados

La localización y mapeo simultáneos entregan como resultados sobre los mapas creados y estadísticas sobre la localización del robot dentro del entorno cerrado.

Los mapas generados tienen concordancia con el ambiente reproducido e indican que tanto el algoritmo de ROS, como la percepción de la cámara Kinect son eficientes en el momento de construir mapas. Así, la figura 45 muestra un ejemplo de mapa creado.

Por otro lado, el algoritmo de corrección de la odometría implementado para la localización del robot móvil en el entorno mapeado presenta el error mostrado en la tabla 63. Los datos mostrados en dicha tabla son tomados entre el centro del robot móvil y el punto definido como destino. Si se compara estos valores con los obtenidos en la tercera evaluación se evidencia una mejora significativa.

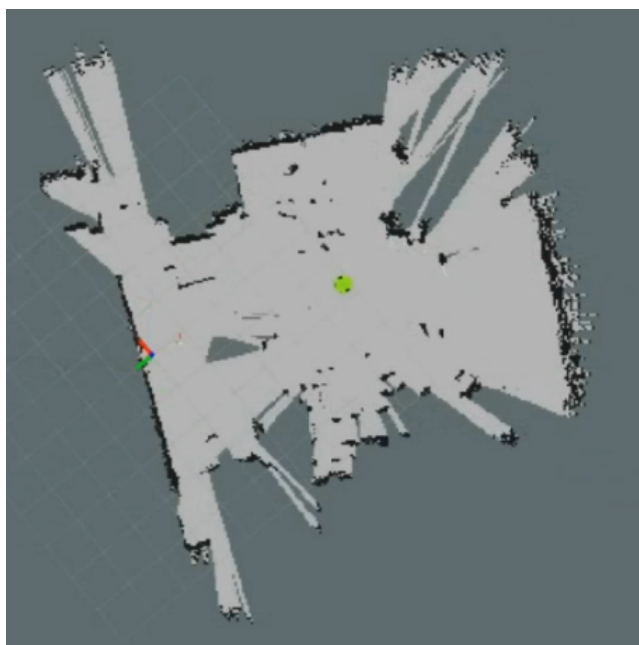


Figura 45: Mapa generado

Tabla 63: Datos de localización en la quinta evaluación

Medida	Desviación en x	Desviación en y
1	3,2 <i>cm</i>	3,9 <i>cm</i>
2	3,8 <i>cm</i>	2,9 <i>cm</i>
3	4,5 <i>cm</i>	3,2 <i>cm</i>
4	3,3 <i>cm</i>	3,8 <i>cm</i>
5	4,1 <i>cm</i>	4,2 <i>cm</i>
Promedio	3,78 <i>cm</i>	3,60 <i>cm</i>
Porcentaje	2,10 %	2,00 %

4.3. Resumen

- La construcción de la plataforma robótica móvil es desarrollada en varias etapas. Primero, se construye la base que será soporte de todos los componentes. Segundo, se instalan componentes operativos y sensores. Luego, se conectan todos los componentes. Después, se instalan los soportes para el módulo de control y el módulo de visión. Finalmente, se incorpora la cámara Kinect y se da detalle al robot móvil.
- Las pruebas de funcionamiento del robot se realizan en cuatro etapas. La primera se efectúa una vez instalado los componentes operativos. La segunda evalúa al robot teleoperado. La tercera interpreta los resultados de odometría del robot. La cuarta registra desempeño del autómata una vez integrada la navegación reactiva. La última pone a prueba la localización y mapeo simultáneos.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido a partir del trabajo realizado. También, se abordan las futuras líneas de investigación que se plantean a partir de las incógnitas generadas en la elaboración del proyecto.

5.1. Conclusiones

Con la realización del presente trabajo se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y construyó un prototipo de plataforma robótica móvil para interiores, cuyo movimiento es producido por motores a pasos configurados para desplazamiento diferencial. El robot es capaz de realizar localización y mapeo simultáneos apoyado en mecanismos de odometría y visión. Adicionalmente, la plataforma puede ser teleoperada mediante un mando remoto y es capaz de detectar obstáculos dinámicos gracias a un sistema de navegación reactiva. Finalmente, el control del robot móvil fue desarrollado en el sistema operativo robótico (ROS) e integra componentes de tecnología abierta.
- A través del análisis del estado del arte sobre robótica móvil se ha podido entender conceptos fundamentales que han sido aplicados en el trabajo. También, se ha recopilado información sobre las diferentes aportaciones en este campo obteniendo una idea de los últimos logros y adelantos en este campo a nivel nacional, regional y mundial. Por último, la investigación de los trabajos existentes ha servido para implementar algunas ideas interesantes en el proyecto desarrollado.
- Partiendo del análisis de robots móviles existentes, se ha realizado una distribución de las características operativas de la plataforma en nueve módulos: base, tracción, potencia, energético, navegación reactiva, odometría, adquisición y

mando, visión y control. Como resultado del proceso de construcción se obtuvo una plataforma robótica móvil de dos grados de libertad cuyas dimensiones son $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}$. El peso incluido el computador portátil es de 10 kg . El ángulo máximo que una rampa puede tener para que el robot la supere es de 15° . El tiempo operativo es de aproximadamente 7 horas, pero puede variar dependiendo de la carga que tenga el robot.

- El desarrollo del control de la plataforma robótica móvil usando el sistema operativo robótico (ROS) involucra el desarrollo de seis nodos. Los nodos de navegación reactiva, odometría y visión obtienen datos de las condiciones del robot. El nodo de control de motores comanda los actuadores que sirven para el desplazamiento del autómata. Los nodos de operación remota y SLAM se encargan de la operación manual y del sentido de autonomía de la plataforma respectivamente. Estos nodos están dispuestos en una distribución jerárquica que permite tener un control coherente de la plataforma robótica móvil.
- La implementación de la capacidad del robot de realizar localización y mapeo simultáneos permite concluir que los mapas creados tienen un alto nivel de parentesco con el patrón reproducido, permitiendo tener mayor independencia del entorno en el que se desenvuelve el robot móvil. También, se concluye que el algoritmo de corrección de odometría reduce significativamente el error obtenido durante las pruebas sin dicho algoritmo. De esta manera se puede tener una estimación más confiable de la posición actual de la plataforma, lo que supone un aporte notable a la autonomía del robot.
- Se ha evaluado el funcionamiento del robot móvil en cada etapa de desarrollo. Los resultados presentan que el mecanismo de desplazamiento diferencial es adecuado para la operatividad de la plataforma en interiores, pues los espacios son reducidos impidiendo las curvas de desplazamiento con radios de giro grandes. Otro punto destacable en las pruebas realizadas es la ausencia de retardos en la comunicación entre el controlador desarrollado en ROS y el autómata. También, se concluye que las señales provenientes de los sensores, instalados en el batidor, requieren algoritmos computacionales de acondicionamiento que corrijan los datos adquiridos. Por último, la plataforma funcionando a toda su capacidad es capaz de cumplir el objetivo de generar mapas y localizarse dentro de ellos de forma simultánea.
- Finalmente, el desarrollo del proyecto ha permitido generar conocimiento sobre robótica móvil. Por tal motivo, es importante realizar la publicación de un

artículo científico sobre los detalles diseño, construcción, evaluación y puesta en marcha del presente trabajo. Es así que dicho artículo se ha dividido en varias partes que se encuentra en proceso de aprobación en revistas con distintos enfoques académicos.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

- La construcción de una plataforma robótica móvil en módulos permite la incorporación de nuevos elementos para variar el funcionamiento. Así, en futuros trabajos el módulo de visión permitiría desarrollar odometría visual, mecanismo de percepción que reemplazaría a los encoders y giroscopios como método para determinar valores de desplazamiento del robot. Esta implementación reduciría notablemente los efectos de los errores sistemáticos y no sistemáticos del módulo de odometría.
- Otro cambio notable del robot móvil cuando se agrega módulos de visión, es la capacidad de teleoperarlo desde una estación fija. Para ello se puede incluir una conexión en red que permita intercambiar información entre computadores. Al desarrollar este tipo de operación del robot, es necesario señalar que se operaría dentro de los rangos de un área cerrada. Esto abre otro campo de desarrollo dentro de robótica móvil, pues la teleoperación desde estación fija sería mucho más interesante si se apoya en un robot móvil para exteriores.
- El desarrollo de un robot autónomo permite concebir nuevas ideas dentro de la robótica. Al incluir un robot social se puede crear un mayordomo que interactúe con los usuarios, operarios y visitantes de un ambiente como un laboratorio. La interacción significa que el robot pueda percibir comandos visuales o sonoros. Otra forma de interacción con personas o elementos del ambiente se puede conseguir al incorporar un manipulador. Esto podría ayudar al robot a repartir correspondencia, intercambiar objetos entre estaciones, asistir al humano en actividades de servicio como mesero, entre otros.
- Otra iniciativa que llama la atención es la elaboración de un control distribuido que permita incorporar varios robots móviles con características semejantes y crear un sistema multirobot. Estos sistemas que puede cumplir una tarea en forma conjunta, es decir, cada robot puede realizar una tarea en forma individual para obtener un beneficio propio o conjunto. El desarrollo de este sistema es ardua pues el comportamiento de un robot afecta al de otros.

- La implementación de la plataforma abre un campo de investigación sobre robot móviles que incluye solventar problemas de localización como robot secuestrado, entorno dinámico, entre otros. También, se puede innovar en técnicas de localización y mapeo simultáneos como FastSLAM, GraphSLAM y SLAM 3D.

Bibliografía

- [Axon Robotics, 2014] Axon Robotics (2014). Intellibot how it works? Online.
- [Barnes & Jentsch, 2010] Barnes, M. & Jentsch, F. (2010). *Human-robot interactions in future military operations*. Ashgate Publishing Company.
- [BBC Corp, 2014] BBC Corp (2014). Robots then and now.
- [Bell, 1985] Bell, T. (1985). Robots in the home: Promises, promises: While great expectations are held for certain robot types, the robots for fun and educational purposes are limited in their adaptability to useful tasks. *Spectrum, IEEE*, 22(5), 51–55.
- [Bellinger, 1971] Bellinger, L. (1971). Self-propelled random motion lawnmower. US Patent 3,570,227.
- [Boston Dynamics, 2013] Boston Dynamics (2013). Bigdog: The most advanced rough-terrain robot on earth. Online.
- [Bräunl, 1998] Bräunl, T. (1998). *Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embebbed Systems*. Springer.
- [Capek et al., 1920] Capek, K., Playfair, N., Selver, P., & Landes, W. (1920). Rossum's universal robots. *Prague, CZ*.
- [Cardenas & Simbaña, 2007] Cardenas, N. & Simbaña, G. (2007). Diseño y construcción de un robot móvil didáctico para estudios experimentales de robótica cooperativa. Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana.
- [Cetto, 2003] Cetto, J. A. (2003). *Environment learning for indoor mobile robots*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [Chong & Kleeman, 1997] Chong, K. S. & Kleeman, L. (1997). Accurate odometry and error modelling for a mobile robot. In *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, volume 4 (pp. 2783–2788).: IEEE.

- [D'Andrea, 2012] D'Andrea, R. (2012). Guest editorial: A revolution in the warehouse: A retrospective on kiva systems and the grand challenges ahead. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 9(4), 638–639.
- [Diaz & Dutra, 2013] Diaz, J. F. A. & Dutra, M. S. (2013). Estudio y modelamiento del robot kuka kr 6. *Revista Facultad de Ingeniería*, (46), 132–144.
- [Engel et al., 2014] Engel, J., Schöps, T., & Cremers, D. (2014). Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam. In *Computer Vision–ECCV 2014* (pp. 834–849). Springer.
- [Fahimi, 2009] Fahimi, F. (2009). *Autonomous Robots: Modeling, Path Planning and Control*. Springer.
- [Forza Power Technologies, 2015] Forza Power Technologies (2015). *FUB-1260*. Forza Power Technologies.
- [Fowler, 2008] Fowler, C. (2008). A walk through time: Early clocks. *NIST Physics*.
- [Geppert, 2004] Geppert, L. (2004). Qrio, the robot that could. *Ieee Spectrum*, 41(5), 34–37.
- [Granda, 2012] Granda, D. (2012). Mapas de entornos mediante navegación difusa. *Repositorio Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*.
- [Holland, 2004] Holland, J. M. (2004). *Designing autonomous mobile robots: inside the mind of an intelligent machine*. Newnes.
- [Holland, 2007] Holland, O. (2007). Grey walter: the pioneer of real artificial life. In *Proceedings of the 5th international workshop on artificial life* (pp. 34–44).
- [Jones et al., 2010] Jones, J., Flynn, A., & Seiger, B. (2010). *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. AK.
- [Kim et al., 2007] Kim, H.-D., Seo, S.-W., Jang, I.-H., & Sim, K.-B. (2007). Slam of mobile robot in the indoor environment with digital magnetic compass and ultrasonic sensors. In *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS'07. International Conference on* (pp. 87–90).: IEEE.
- [Kim & Kim, 2004] Kim, S. & Kim, Y. (2004). Robot localization using ultrasonic sensors. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 4 (pp. 3762–3766).: IEEE.
- [Kurfess, 2005] Kurfess, T. (2005). *Robotics and automation handbook*. CRC press.

- [Li et al., 1994] Li, Y., Lee, M. H., Rodrigues, M., & Rowland, J. J. (1994). Supervisory robotic control under vision guidance. In *Intelligent Robots and Systems' 94: Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS'94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on*, volume 3 (pp. 2030–2035).: IEEE.
- [Mondada et al., 1999] Mondada, F., Franzi, E., & Guignard, A. (1999). The development of khepera. In *Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the First International Khepera Workshop*, number LSRO-CONF-2006-060 (pp. 7–14).
- [Montemerlo et al., 2002] Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B., et al. (2002). Fastslam: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem. In *AAAI/IAAI* (pp. 593–598).
- [Nelson, 2014a] Nelson, J. (2014a). Luna rover. *NASA*.
- [Nelson, 2014b] Nelson, J. (2014b). Mars pathfinder/sojourner rover. *NASA*.
- [Nelson, 2014c] Nelson, J. (2014c). Mars science laboratory curiosity rover. *NASA*.
- [Open Source Arduino, 2015] Open Source Arduino (2015). Online.
- [Open Source Robotics Foundation, 2014] Open Source Robotics Foundation (2014). Turtlebot. Online.
- [Oxford University, 2014] Oxford University (2014). Oxford dictionaries. Online.
- [Roller et al., 2003] Roller, D., Montemerlo, M., Thrun, S., & Wegbreit, B. (2003). Fastslam 2.0: an improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- [Romeva, 2010] Romeva, C. R. (2010). *Diseño concurrente*, volume 126. Univ. Politèc. de Catalunya.
- [Rosheim, 1994] Rosheim, M. (1994). *Robot evolution: the development of anthropotics*. John Wiley & Sons.
- [Ruiz et al., 2011] Ruiz, J., Galindo, C., Gonzalez, J., & Blanco, J. (2011). Navegación reactiva de un robot móvil usando kinect. *Actas ROBOT 2011*.
- [Sakagami et al., 2002] Sakagami, Y., Watanabe, R., Aoyama, C., Matsunaga, S., Higaki, N., & Fujimura, K. (2002). The intelligent asimo: System overview and integration. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3 (pp. 2478–2483).: IEEE.

- [Siciliano, 2002] Siciliano, B. (2002). *Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer.
- [Siciliano & Khatib, 2008] Siciliano, B. & Khatib, O. (2008). *Springer handbook of robotics*. Springer.
- [Siegwart et al., 2011] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
- [Taddri, 2007] Taddri, M. (2007). *Leonardo da Vinci's Robots*. Leonardo3.
- [Takagi, 2006] Takagi, S. (2006). Toyota partner robots. *Journal-Robotics Society of Japan*, 24(2), 62.
- [Taylor, 2006] Taylor, R. (2006). A perspective on medical robotics. *Proceedings of the IEEE*, 94(9), 1652–1664.
- [Thrun et al., 2005] Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2005). *Probabilistic robotics*. MIT press.
- [Veiga et al., 2012] Veiga, I., Zymler, R., Shayani, R., Viana, D., & Orrico, M. (2012). Sizing of motor and battery pack for an automotive electric vehicle given a specific route. In *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES* (pp. 1–8).: IEEE.
- [Wantai Electrical, 2015a] Wantai Electrical (2015a). *57BYGH Series hybrid stepping motor*. Changzhou Wantai Electrical Appliance Co., Ltd.
- [Wantai Electrical, 2015b] Wantai Electrical (2015b). *Manual of 2-phase hybrid stepper motor driver DQ542M*. Changzhou Wantai Electrical Appliance Co., Ltd.
- [Welch & Bishop, 1995] Welch, G. & Bishop, G. (1995). An introduction to the kalman filter.
- [Willcox et al., 2007] Willcox, S., Bondaryk, J., Streitlien, K., Emblen, C., & Morrison, J. (2007). A bluefin-12 based system solution for the us navy's surface mine counter-measures unmanned underwater vehicle program: increment 2 (smcm/uuv-2). *Bluefin Robotics Corporation Web site, May, 3*.
- [Woodcroft, 1863] Woodcroft, B. (1863). *Brief biographies of inventors of machines for the manufacture of textile fabrics*. Longman, Green, Longman, Roberts and Green.

[Zhang, 2012] Zhang, Z. (2012). Microsoft kinect sensor and its effect. *MultiMedia, IEEE*, 19(2), 4–10.

[Zikos & Petridis, 2014] Zikos, N. & Petridis, V. (2014). 6-dof low dimensionality slam (l-slam). *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, (pp. 1–18).