

# **ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA EXTERIORES DE UN ROBOT MÓVIL TERRESTRE USANDO ROBOT OPERATING SYSTEM**

**ESTEBAN CASTAÑO CASTAÑO  
JOHAN SEBASTIAN SOLARTE BOLAÑOS**

Anteproyecto  
Ingeniería electrónica

Director:  
ALEXÁNDER MARTÍNEZ ÁLVAREZ

Codirector:  
JUAN DAVID CONTRERAS PÉREZ

Cali, Julio 2021

© 2021, CASTAÑO E., SOLARTE S.

Santiago de Cali, junio 30 del 2021.

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana Cali.**

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Director Carrera de Ingeniería Electrónica.

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a su consideración el anteproyecto de grado titulado “ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA EXTERIORES DE UN ROBOT MÓVIL TERRESTRE USANDO ROBOT OPERATING SYSTEM.” con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la Universidad para llevar a cabo el proyecto de grado y posteriormente optar al título de Ingeniero Electrónico.

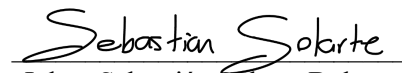
Al firmar aquí, damos fe que entendemos y conocemos las directrices para la presentación de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias, aprobadas el 26 de noviembre de 2009, donde se establecen los plazos y normas para el desarrollo del anteproyecto y del trabajo de grado.

Atentamente,



Esteban Castaño Castaño

Código: 8934992



Johan Sebastián Solarte Bolaños

Código: 8935928

Santiago de Cali, junio 30 del 2021.

Señores

**Pontificia Universidad Javeriana Cali.**

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano

Director Carrera de Ingeniería Electrónica.

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos informarle que los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Esteban Castaño Castaño (Cód.: 8934992) y Johan Sebastián Solarte Bolaños (Cód.: 8935928) trabajan bajo nuestra dirección en el proyecto de grado titulado “ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA EXTERIORES DE UN ROBOT MÓVIL TERRESTRE USANDO ROBOT OPERATING SYSTEM”.

Atentamente,

  
PhD. Alexander Martínez Álvarez

  
M.Eng. Juan David Contreras Pérez

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ABSTRACT	iv
RESUMEN	v
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
5. MARCO TEÓRICO	7
5.1. Fundamentación teórica . . . . .	7
5.1.1. Global Navigation Satellite System (GNSS) . . . . .	7
5.1.2. Sistema de Navegación . . . . .	7
5.1.3. Sistema de Navegación en ROS . . . . .	8
5.1.4. Simulación de Sistemas de Navegación en Gazebo . . . . .	9
5.2. Antecedentes . . . . .	9
5.3. Estado actual del robot DaNI . . . . .	11
6. MÉTODO	13
6.1. Actividades . . . . .	13
6.1.1. Objetivo 1: Evaluar el estado actual del hardware del Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI) de National Instruments. . . . .	13
6.1.2. Objetivo 2: Seleccionar los componentes que serían reemplazados o añadidos a la plataforma robótica. . . . .	13
6.1.3. Objetivo 3: Seleccionar algoritmos utilizados en sistemas de navegación implementables con ROS. . . . .	14
6.1.4. Objetivo 4: Implementar y programar el sistema navegación, basado en el hardware y los algoritmos de navegación seleccionados. . . . .	14

6.1.5. Objetivo 5: Evaluar el desempeño del sistema de navegación implementado. .	15
6.2. Materiales . . . . .	15
6.3. Resultados esperados . . . . .	16
6.4. Cronograma . . . . .	16
7. RECURSOS	18
7.1. Recursos humanos . . . . .	18
7.2. Recursos técnicos . . . . .	19
7.3. Presupuesto . . . . .	19
REFERENCIAS	21

## ABSTRACT

Currently, there is an interest in the academic institutions of the country to develop mobile robotics. For a land mobile robot, the navigation system is a vital part to fulfill its tasks. However, among the commercial developments of land mobile robotics used by academic institutions such as the Pontificia Universidad Javeriana Cali, there are non-scalable or limited platforms with little flexibility in the programming of highly complex algorithms, this leads to the fact that in the research processes within the University difficulties are generated in the implementation of developments in mobile robotics and/or their continuity, in addition to high licensing costs. Therefore, it is of utmost importance to take into account the advantages of platforms such as ROS, among which are the modularity, flexibility and use of a collection of tools that simplify the task of creating a complex and robust robotic behavior. Thus, an investigation is approached around How to update the navigation system of a land mobile robot based on LabView, using Robot Operating System (ROS), taking into account the developments implemented with this *framework*? and How to evaluate the performance of the navigation system so that its operation can be measured? Therefore, the solution to the problem revolves around upgrading an outdoor navigation system using Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI) as the physical test platform and ROS as the software platform. Therefore, a division of the work into the following stages is proposed: consultation and analysis, implementation, programming, testing and documentation.

Thus, the first chapter of this document details the problem statement. In the second chapter, the objectives that contribute to solve this problem. In the third part, a justification of the realization of this work is made. In the fourth chapter, the scope and limitations are mentioned. In the fifth chapter, theoretical aspects and background that serve as a guide to solve the challenges present in the research are detailed, and in the sixth chapter, the method used to develop the solution is described, and finally, the necessary human and technical resources are detailed.

**Keywords:** Ground Mobile Robot, Navigation, Robot Operating System, ROS, Autonomous robots, Robotics.

## RESUMEN

Actualmente existe un interés en las instituciones académicas del país por desarrollar robótica móvil. Para un robot móvil terrestre, el sistema de navegación es parte vital para cumplir sus labores. Sin embargo, entre los desarrollos comerciales de robótica móvil terrestre usados por instituciones académicas como la Pontificia Universidad Javeriana Cali, existen plataformas no escalables o limitadas y con poca flexibilidad en la programación de algoritmos de alta complejidad, esto lleva a que en los procesos de investigación dentro de la Universidad se generen dificultades de implementación de desarrollos en robótica móvil y/o continuidad de los mismos, además de altos costos de licenciamiento. Por lo tanto, es de suma importancia tener en cuenta el aprovechamiento de las ventajas de plataformas como ROS entre las cuales están la modularidad, flexibilidad y uso de una colección de herramientas que simplifican la tarea de crear un comportamiento robótico complejo y robusto. Así pues, se aborda una investigación en torno a ¿Cómo actualizar el sistema de navegación de un robot móvil terrestre basado en LabView, usando Robot Operating System (ROS), teniendo en cuenta los desarrollos implementados con este *framework*? y ¿Cómo evaluar el desempeño del sistema de navegación de forma tal que se pueda medir su funcionamiento?

Por lo tanto, la solución de la problemática, gira en torno al actualización de un sistema de navegación para exteriores utilizando como plataforma física de prueba el Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI) y como plataforma de software, ROS. Por consiguiente, se propone una división del trabajo en las siguientes etapas: consulta y análisis, implementación, programación, pruebas y documentación.

Así pues, en el primer capítulo de este documento se detalla el planteamiento del problema. En el segundo capítulo, los objetivos que contribuyen a solucionar este problema. Como tercera parte se realiza una justificación de la realización de este trabajo. En el cuarto capítulo se mencionan los alcances y limitaciones. En el quinto capítulo, se detallan aspectos teóricos y antecedentes que sirven de guía para solucionar los retos presentes en la investigación. En el sexto capítulo se realiza un recuento del método con el cual se va a desarrollar la solución y finalmente se detallan los recursos humanos y técnicos necesarios.

**Palabras Claves:** Robot Móvil Terrestre, Navegación, Robot Operating System, ROS, Robots Autónomos, Robótica.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estimaba que para 2017 Colombia contaba con no más de 500 equipos robots instalados en la industria [1] y algunos estudios del 2015, estimaban que para el 2018 en los países del continente americano, exceptuando a Brasil, Estados Unidos, México y Canadá, se tendrían alrededor de 1700 robots [2]. Si bien estas cifras se refieren a robótica en general, en cuanto a robótica móvil terrestre, la estimación del número de robots es incierta. A pesar de lo anterior, existe un interés en las instituciones académicas del país por desarrollar robótica móvil, referenciada en grupos de investigación, concursos de robótica, trabajos de grado y proyectos entre el sector productivo, la universidad y el Estado [2].

Una línea de investigación en robótica móvil que cada vez está siendo más desarrollada, es el problema de navegación. Para un robot móvil, un entorno abierto es básicamente desconocido [3], por lo tanto requiere un sistema de navegación que le permita moverse en él para que pueda cumplir con sus tareas de forma autónoma. Este sistema de navegación debe incluir tanto dispositivos hardware como un sistema software que los gestione. En la actualidad se usa un conjunto de tecnologías implementadas en plataformas robóticas, que le permiten a la misma, partir del conocimiento de su ubicación, para llegar hasta un destino planeado.

Entre los desarrollos comerciales de robótica móvil terrestre generados por la industria de otros países e importados por Colombia, se encuentran kits de robótica móvil como los de National Instrument (NI), los cuales han sido usados por la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, para implementar proyectos de robótica. Estos kits son intuitivos, interactivos y fácilmente programables debido a su lenguaje de programación gráfica en la plataforma predeterminada de LabView© [4]. Sin embargo, estas mismas bondades convierten a la plataforma de desarrollo en un espacio no escalable o limitado; esto debido a que cuenta con poca flexibilidad en la programación de algoritmos de alta complejidad y a que se tratan de plataformas de programación de uso generalizado en la ingeniería y no especializadas directamente en robótica. Continuar con el uso de una tecnología con tales limitaciones y con un alto costo de licenciamiento para los procesos de investigación dentro de la Universidad, genera dificultades en la implementación de desarrollos en robótica móvil e incluso en la continuidad de los mismos.

Por otro lado, estos kits cuentan con sistemas de navegación con más de 10 años de antigüedad [5] que aunque con actualizaciones periódicas en el software, no cuentan con el avance de tecnologías más modernas como ROS. Además presenta elementos de hardware desusados o antiguos. En consecuencia, esto lo convierte en un sistema desactualizado que puede afectar al rendimiento de su sistema de navegación.

En síntesis, un sistema de navegación antiguo basado en soluciones comerciales para robots móviles terrestres, podría generar una reducción en la capacidad de las prestaciones del mismo afectando a factores claves que permiten una operación autónoma realmente útil [6], además de retrasar o limitar los desarrollos de la robótica móvil terrestre. Por lo tanto, es pertinente realizar una actualización que permita al sistema de navegación ser implementado con ROS y aprovechar las ventajas de una plataforma que se consolida como un estándar en la robótica, que pueda ser usado dentro de las actividades de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. [7]

Con respecto a lo descrito previamente, se generan las siguientes preguntas que guiarán el desarrollo de la investigación: ¿Cómo actualizar el sistema de navegación de un robot móvil terrestre basado en LabView, usando ROS, teniendo en cuenta los desarrollos implementados con este *framework*? ¿Cómo evaluar el desempeño del sistema de navegación de forma tal que se pueda medir su funcionamiento?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

- Actualizar el sistema de navegación, en sus componentes hardware y software, de un robot móvil terrestre comercial haciendo uso de ROS.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el estado actual del hardware del Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI) de National Instruments.
- Seleccionar los componentes que serían reemplazados o añadidos a la plataforma robótica.
- Seleccionar algoritmos utilizados en sistemas de navegación implementables con ROS.
- Implementar y programar el sistema de navegación, basado en el hardware y los algoritmos de navegación seleccionados.
- Evaluar el desempeño del sistema de navegación implementado.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En Colombia existen desarrollos de robots móviles terrestres con sistemas de navegación autónoma para exteriores en universidades. En el caso de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, se adquirieron los robots móviles terrestres DaNI y sobre ellos se han realizado diferentes investigaciones y desarrollos. Estos robots cuentan con un hardware y un software del fabricante National Instruments con más de 10 años de antigüedad. Al estar limitados a este fabricante, se genera un costo por el uso de la plataforma de programación, que no es especializada en robótica y por lo tanto, es poco flexible.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha encontrado que el uso de ROS para el desarrollo del sistema de navegación de un robot móvil terrestre permitirá una mayor flexibilidad para programar los requerimientos especializados, los cuales podrían resultar complejos de desarrollar en entornos de programación gráfica. Por el contrario, ROS, es un entorno especializado en robótica, con una colección de herramientas, bibliotecas y convenciones que tienen como objetivo simplificar la tarea de crear un comportamiento robótico complejo y robusto en una amplia variedad de plataformas robóticas [8] y además se puede generar soluciones fáciles de implementar en cualquier lenguaje de programación moderno, como Python, C++ y Lisp, o bajo bibliotecas en Java y Lua. [9]

Adicional a esto, el uso de ROS permitirá desarrollar soluciones de sistema de navegación mediante la contribución que otros usuarios de la plataforma han implementado, esto debido a que posee una característica de modularidad, con la cual se puede extraer subsistemas de soluciones distintas y moldearlo a la solución deseada. Lo anterior es posible, debido a que se trata de un popular *middleware* de robótica de código abierto [10] que tiene una licencia abierta muy permisiva que permite la reutilización en productos comerciales y de código cerrado [11], con lo cual se crean desarrollos sin barreras económicas y sin depender de un fabricante.

Además, gracias a su modularidad, ROS permite la realización de los proyectos robóticos por etapas con la posibilidad de mejorar el sistema de navegación sin necesidad de cambios profundos [10], esto permitiría que el proyecto pueda ser continuado por otros estudiantes o investigadores interesados en el mejoramiento continuo. También es importante resaltar que ROS contiene un sistema robusto de simulación, como Gazebo, el cual proporciona un terreno común para probar cualquier solución robótica [12], permitiendo trabajar con modelos bajo leyes físicas, lo

que garantiza que el robot o proceso simulado presente una alta confiabilidad al momento de implementarlo en el mundo real. [13] [14]

Al cumplir con el objetivo general de este trabajo de grado, se fortalecerá la investigación dentro de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali e incentivará la producción de trabajos futuros de sus estudiantes en el área de la robótica, al poder contar con una plataforma abierta, más actualizada, de mejor desempeño y con tecnologías que son usadas actualmente en las universidades a nivel mundial. Por ejemplo, a pesar de que este trabajo de grado no está enlazado directamente, se conoce del proyecto de investigación a nivel nacional denominado ÓMICAS, siendo la Universidad Javeriana Cali su institución ancla. En éste se ha identificado la importancia de la robótica móvil y la navegación autónoma para cumplir algunos de sus objetivos como la evaluación y estimación de variables de cultivo para desarrollar soluciones innovadoras que le aportan a los retos de seguridad alimentaria y sostenibilidad productiva del agro [15]. Finalmente, sería entonces el recurso actualizado un puente entre los estudiantes interesados y programas de investigación.

Así, es posible concluir que indagar por la actualización de un sistema de navegación para exteriores basado en ROS, es relevante para brindar nuevas características como modularidad y flexibilidad de los sistemas de navegación de un robot móvil terrestre, generando facilidad de implementación y continuación de los proyectos desarrollados con éste, fomentando así el impulso de la robótica para el desarrollo académico e industrial de la región.

#### **4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

Los alcances de este trabajo de grado se limitan a presentar un robot móvil terrestre DaNI con un sistema de navegación para exteriores, basado en ROS y algunos de sus componentes de hardware reemplazados, capaz de seguir trayectorias que son referenciadas con la ayuda de puntos establecidos por coordenadas GPS, que son ingresados por el usuario mediante una interfaz gráfica.

Es importante tener en cuenta que se buscará mejorar las características del sistema de navegación, de acuerdo con las posibilidades que brinde la tecnología utilizada.

Las pruebas del sistema de navegación para exteriores, serán realizadas en un ambiente controlado, por lo tanto, no se requieren normativas de seguridad, en cuanto no son considerados robot colaborativos, pero si serán tenidas en cuenta aquellas que involucren las frecuencias de comunicación de los elementos de radio.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. Fundamentación teórica

Para abordar este problema se dedicó parte de la investigación al entendimiento de los sistemas de navegación en la robótica móvil, centrándose en su definición, elementos, metodologías y ejemplos implementados en los diversos robots y aplicaciones.

#### 5.1.1. Global Navigation Satellite System (GNSS)

El *Global Navigation Satellite System* (GNSS) o Sistema Global de Navegación por Satélite, se concibió y se construyó por primera vez para la navegación y el cronometraje preciso. Además, este puede usarse para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre por sus ventajas de cobertura global, operaciones en cualquier condición meteorológica y bajo costo. Así pues, las aplicaciones científicas del GNSS incluyen el GNSS-RO para la vigilancia de la atmósfera, el GNSS-R para la observación del mar, el suelo, el hielo y otros parámetros geofísicos de la Tierra, la vigilancia del centelleo de la ionosfera, entre otros [16]. Actualmente, se encuentran en funcionamiento cuatro GNSS independientes, siendo estos: el sistema de posicionamiento global (GPS) desarrollado por Estados Unidos, GLONASS de origen ruso, Galileo de la Unión Europea y el sistema de navegación por satélite Beidou (BDS) [17], siendo el más reciente logrando para 2020 la cobertura global de su tecnología.

#### 5.1.2. Sistema de Navegación

Técnicamente, un sistema de navegación puede ser visto como un instrumento que le permite al robot móvil conocer su ubicación, la ubicación del destino y cómo puede alcanzarla satisfactoriamente, incluyendo tareas como detectar y evitar obstáculos, planificar rutas y construir mapas. Estos sistemas incluyen por lo general, un sistema de control en cooperación de diversos sensores como LiDARs (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), IMU (*Inertial Measurement Unit*) [18], cámaras, sensores ultrasónicos, GPS [19], encoders y algoritmos como el filtro de Kalman y SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) [20] [21].

Dependiendo del sensor en los que estén basados, se pueden encontrar diferentes tipos de sistemas de navegación. Una de las soluciones al problema de navegación, entre muchas otras, es hacer una fusión de datos y mediciones de varios sensores diferentes. En el campo de la fusión de sensores para la navegación de robots móviles, existen muchos enfoques y soluciones diferentes tales como: Teoría de decisión bayesiana, teoría de evidencia de Dempster-Shafer (DS), modelo de factor de peso, filtro de Kalman, lógica difusa y redes neuronales artificiales [22]. De esta última lista, el filtro de Kalman o filtro de Kalman extendido (para sistemas no lineales) se introduce como técnica para estimar variables de estado no observables, a partir de variables observables que pueden contener algún error de medición. [23]

### 5.1.3. Sistema de Navegación en ROS

Por otro lado, es importante comprender cómo desde ROS se interpreta todo lo necesario para diseñar un sistema de navegación. Para esto, es necesario entender la arquitectura ROS, la cual se implementa utilizando nodos que son las unidades ejecutables básicas. Cada nodo se comunica con otros nodos mediante mensajes. La comunicación del mensaje se divide en tres tipos diferentes (*topics*, servicios y acciones). Los *topics* son formas de comunicación unidireccionales y continuas entre nodos, en la cual hay un emisor (*publisher*) y uno o varios receptores (*suscribers*) [24]. Los servicios y acciones son comunicación bidireccional, con servidores y clientes. Su primordial diferencia es que cuando se llama un servicio, el robot tiene que esperar hasta que este haya acabado antes de hacer otra cosa, mientras que cuando se llama una acción, el robot puede seguir ejecutando otra actividad mientras hace dicha acción. [25].

Además, ROS cuenta con *packages*, que son un mecanismo para crear colecciones mínimas de código para una fácil reutilización. Los *stacks*, recopilan *packages*, para brindar alguna funcionalidad en conjunto. En este contexto, *Navigation Stack*, toma relevancia, ya que es un sistema que permite a un robot moverse por el *mundo* hasta una posición objetivo específica de manera eficiente y sin golpear cosas en el camino. Integra la información del mapa, el sistema de localización, los sensores y la odometría para planificar un buen camino desde la posición actual hasta la posición objetivo, y luego lo sigue. Si el robot se atasca, generalmente debido a algunos obstáculos no asignados, puede volver a planificarse y recuperarse [26].



La *Navigation Stack*, es una de las partes de ROS más utilizadas, ya que casi todos los robots que se mueven la utilizan. El *stack* funciona, a grandes rasgos, mediante cuatro pasos [26]:

- Se envía un *goal* (meta) de navegación a la *Navigation Stack*, especificando posición y orientación en algún marco de coordenadas.
- *Navigation Stack*, utiliza un algoritmo de planificación de rutas en el planificador global para planificar la ruta más corta desde la ubicación actual hasta la meta.
- Esta ruta se pasa al planificador local, que intenta conducir el robot a lo largo de la ruta. El planificador local utiliza la información de los sensores para evitar obstáculos que aparecen frente al robot pero que no están en el mapa. Si el planificador local se atasca y no puede avanzar, puede pedirle al planificador global que elabore un nuevo plan y luego intentar seguirlo.
- Cuando el robot se acerca a la pose del objetivo, la acción termina.

#### **5.1.4. Simulación de Sistemas de Navegación en Gazebo**

Por último, cabe señalar sobre el entorno de Gazebo, que ofrece la capacidad de simular de forma precisa y eficiente poblaciones de robots en entornos complejos de interior y exterior. Cuenta con un motor de física robusto, gráficos de alta calidad y convenientes interfaces programáticas y gráficas. Esto lo logra, simulando aspectos de movilidad y manipulación [26] , interpretando la dinámica del robot, fuerzas, e incluso simular sensores dentro del entorno. [25] [27]

### **5.2. Antecedentes**

Se investigaron trabajos de grado en los repositorios de algunas de las universidades más reconocidas del país y artículos indexados en bases de datos de investigación académica, donde se resaltaron los trabajos relacionados a ROS y robótica móvil terrestre.

Así pues, es común que en los desarrollos de sistemas de navegación con ROS, se utilicen plataformas robóticas comerciales o desarrolladas previamente que sirven de base para estos sistemas y que deben ser previamente analizados tanto en sus módulos de sensado y actuación, como en su cinemática y dinámica dependiendo de su configuración física [28]. Generalmente, las plataformas robóticas comerciales están conformadas por motores, sus controladores y una

tarjeta de desarrollo. En algunas ocasiones se incluye también una cámara de forma predeterminada. En estos dispositivos en los que se ha implementado una navegación autónoma se ha demostrado la flexibilidad de ROS, integrando nuevos sensores en el robot como una IMU, un sensor láser [29], [10] un sensor de posicionamiento global como GPS [30] [31], GPS RTK [32] , o incluso una cámara para su uso con técnicas de SLAM monocular [33]. En ocasiones ha sido necesario reemplazar un dispositivo por uno que cumpla las mismas funciones pero que su desempeño sea mejor para objetivos con características particulares, como detección de profundidad [34]. También se ha encontrado que ha sido necesario realizar un cambio de tarjeta de desarrollo y de baterías que compense el aumento de potencia en procesamiento y energía debido a los sensores que serían agregados [18]. Por otro lado, es de suma importancia resaltar que se ha optado por agregar algún sistema de comunicación como Wi-fi o LoRa que permita el intercambio de datos de forma inalámbrica e instantánea entre el usuario y la plataforma [35]. Seguidamente, estas actualizaciones de sensores, tienen como objetivo proveer la información necesaria para realizar los algoritmos de mapeo y autolocalización y mapeo como SLAM. [36], [37] o percepción y planificación de trayectorias/navegación [38]

Por parte de los trabajos de robótica móvil realizados anteriormente en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, se encontró cuatro trabajos de grado y dos artículos científicos basados en la robótica móvil. De ellos, solo uno cuenta con ROS dentro de su implementación. El más antiguo, [39] realiza e implementa el control reactivo en un vehículo terrestre para lograr su total autonomía. Seguido, se aborda el control por Modos Deslizantes para trabajar sobre la interacción sin colisiones de dos robots terrestres móviles en un espacio común [40]; y la verificación de desempeño de control frente a perturbaciones del entorno, como incertidumbre en mediciones realizadas con sistemas de posicionamiento global convencionales [41]. Adicionalmente en [23] se aborda una estrategia de medición de posición que permita mejorar la precisión en el posicionamiento de una flota de vehículos autónomos, mediante fusión sensorial y filtro de Kalman. En [42] se diseña e implementa una unidad de supervisión y operación (USO), que permita visualizar la ubicación de al menos dos robots tipo UGV (*Unmanned Ground Vehicles*) y las variables sensadas por ellos. Finalmente en [25] se concibe y desarrolla un AGV (*Automated guided vehicle*) modular para la integración de sistemas de manufactura en el Centro de Automatización de Procesos mediante ROS.

### 5.3. Estado actual del robot DaNI

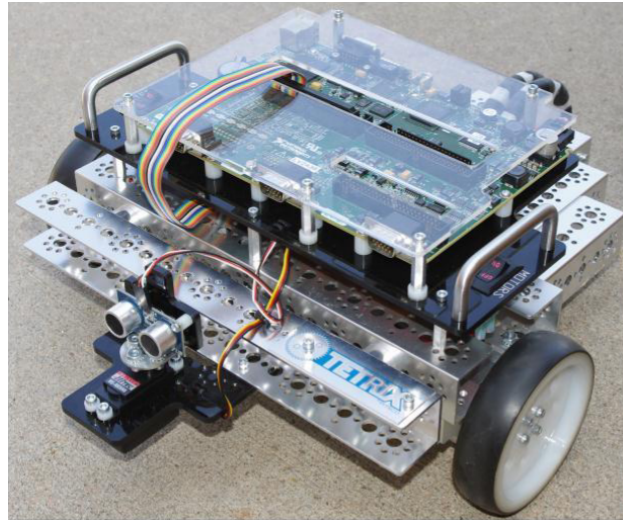


Figura 5.1. Versión original del robot DaNI

El robot DaNI usa una placa reconfigurable de National Instruments, una FPGA para el control de motores y sensores integrados. El robot utiliza dos ruedas de 4 pulgadas en una configuración de transmisión direccional con una rueda omnidireccional de arrastre. Esto lo cataloga como un robot móvil de direccionamiento diferencial no holonómico, donde las ruedas son paralelas, con un punto central, una distancia de separación entre ellas y un control separado para las velocidades angulares de cada una. Este sistema puede verse en la Figura 5.1 [43]

Con respecto a la plataforma robótica a usar, se describe a continuación las características técnicas de este sistema, de acuerdo a los cambios implementados en trabajos anteriores. Esto con el fin de tener una referencia clara de cada uno de los elementos que podrían ser actualizados.

Finalmente se presenta una imagen del robot DaNI, con los cambios implementados,

Tabla 1. Elementos del robot DaNI	
Nombre	Referencia
Tarjeta de procesamiento	SbRIO-9632
Compuertas programables	Xilinx Spartan FPGA
2 Motores	Pitscon Education 12V
Controlador dual de motor DC	Sabertooth 2x10 R/C
Batería recargable	Tetrix 12VDC - 3000mAH
Sensor de ultrasonido	Parallax Ping
Camara inalambrica	D-Link DCS-930L,
GPS	GARMIN 18X PC
Brújula o compás electrónico	CMPS03
Sensor de campo magnético	Philips KMZ51
Regulador de voltaje	NI - 12VDC a 5VDC - 1.5A
Adaptador de red	WL330N ASUS
2 Sensores de velocidad	Sharp encoder 400 PPR - Tipo incremental



Figura 5.2. Diagrama robot DaNI. (National instruments)

## **6. MÉTODO**

### **6.1. Actividades**

Para alcanzar los objetivos específicos se plantean una serie de actividades acordes con los alcances esperados, las cuales tendrán seguimiento periodico mediante reuniones con el director y codirector con una frecuencia quincenal. Además se presenta una lista con los materiales necesarios para desarrollar las diferentes actividades.

#### **6.1.1. Objetivo 1: Evaluar el estado actual del hardware del Robotics Starter Kit 2.0 (DaNI) de National Instruments.**

- **Actividad 1.1:** Evaluación del estado del sistema embebido del robot DaNI.
- **Actividad 1.2:** Evaluación del estado de los sensores y actuadores del robot DaNI.
- **Actividad 1.3:** Evaluación del estado del sistema de potencia del robot DaNI.

##### **Entregables/Productos:**

- Lista del estado actual del robot móvil terrestre DaNI.

#### **6.1.2. Objetivo 2: Seleccionar los componentes que serían reemplazados o añadidos a la plataforma robótica.**

- **Actividad 2.1:** Investigación de referencias de dispositivos que serían reemplazados.
- **Actividad 2.2:** Elaboración de tablas comparativas entre las referencias de cada dispositivo.
- **Actividad 2.3:** Análisis y selección de los nuevos dispositivos.

##### **Entregables/Productos:**

- Lista de los nuevos dispositivos para el robot móvil terrestre DaNI.

### **6.1.3. Objetivo 3: Seleccionar algoritmos utilizados en sistemas de navegación implementables con ROS.**

- **Actividad 3.1:** Análisis de las cinemáticas y las dinámicas de los robots diferenciales.
- **Actividad 3.2:** Investigación y análisis de diferentes técnicas y algoritmos utilizados para la localización y navegación de un robot móvil como la planeación de trayectoria y la planeación de movimiento.
- **Actividad 3.3:** Selección de las técnicas y los algoritmos con base en resultados presentes en el estado del arte.

#### **Entregables/Productos:**

- Descripción teórica de las técnicas y/o algoritmos seleccionados.

### **6.1.4. Objetivo 4: Implementar y programar el sistema navegación, basado en el hardware y los algoritmos de navegación seleccionados.**

- **Actividad 4.1:** Implementación en el robot DaNI de los dispositivos para sistemas de navegación seleccionados anteriormente.
- **Actividad 4.2:** Selección de la versión de Linux, distribución de ROS y paquete de simulación para el desarrollo de la programación.
- **Actividad 4.3:** Descripción del modelo del robot, mediante formato URDF (United Robotics Description Format) para la simulación de la navegación.
- **Actividad 4.4:** Programación y depuración de los módulos de localización, planeación de ruta y movimiento en la navegación.
- **Actividad 4.5:** Programación de una interfaz gráfica de usuario (GUI) para la comunicación con el sistema de navegación.

#### **Entregables/Productos:**

- Hardware del robot DaNI actualizado.
- Códigos de cada módulo programado en ROS.
- Interfaz gráfica de usuario.

### **6.1.5. Objetivo 5: Evaluar el desempeño del sistema de navegación implementado.**

- **Actividad 5.1:** Ideación y ejecución de un plan de pruebas de navegación simulada con los módulos programados.
- **Actividad 5.2:** Ajuste y ejecución del plan de pruebas para la navegación para exteriores del robot móvil terrestre en un escenario físico, teniendo como plataforma el robot DaNI.
- **Actividad 5.3:** Recolección y análisis de datos de la simulación y el desempeño del robot en el entorno real.

#### **Entregables/Productos:**

- Documento con los datos de las simulaciones y las pruebas en el entorno real.
- Análisis y conclusiones de los resultados de las simulaciones y las pruebas en el entorno real.

### **6.2. Materiales**

- Bases de datos especializadas, bibliográficas y librerías digitales.
- 2 computadores portátiles con al menos 8Gb de memoria RAM.
- Distribución de Linux.
- Distribución de ROS.
- Estudios cinemáticos y dinámicos de robots diferenciales.
- Técnicas y algoritmos de localización y navegación.
- Instrumentación y sensores para la plataforma robótica.
- Tarjeta de desarrollo.
- Plataforma robótica DaNI.
- Monitor.
- Mouse.
- Teclado.

### **6.3. Resultados esperados**

Se espera obtener la plataforma DaNI con algunos de sus elementos de hardware actualizados, especialmente su tarjeta de procesamiento que ya no dependería del software LabView, además junto con estos elementos actualizados se tendrá la capacidad de añadir nuevos sensores tales como un LiDAR y una cámara estéreo. Por otra parte, a nivel de software, se espera implementar el sistema de navegación mediante ROS, el cual permita, por su capacidad de modularidad, un fácil cambio de los sensores a futuro. Adicionalmente, se espera que el sistema de navegación realizado en ROS sirva de base para la programación de robots móviles terrestres teniendo como ventaja la fácil implementación de esa misma estrategia para otros robots móviles.

Por otro lado, se pondrá a disposición del público en general el repositorio de códigos en ROS para la navegación de un robot móvil terrestre que sigue rutas específicas creadas mediante una interfaz gráfica de usuario en la cual se establecen las coordenadas GPS necesarias para la ruta. Por otro lado, la Pontificia Universidad Javeriana obtendría un prototipo funcional basado en la plataforma DaNI que integra las modificaciones del hardware y el software.

### **6.4. Cronograma**

El tiempo total del proyecto se ejecutará en 136 días, y 533 horas (cada día de trabajo consta de 4 horas, a excepción de las reuniones cuya duración es de 3 horas), distribuidas de la siguiente manera:



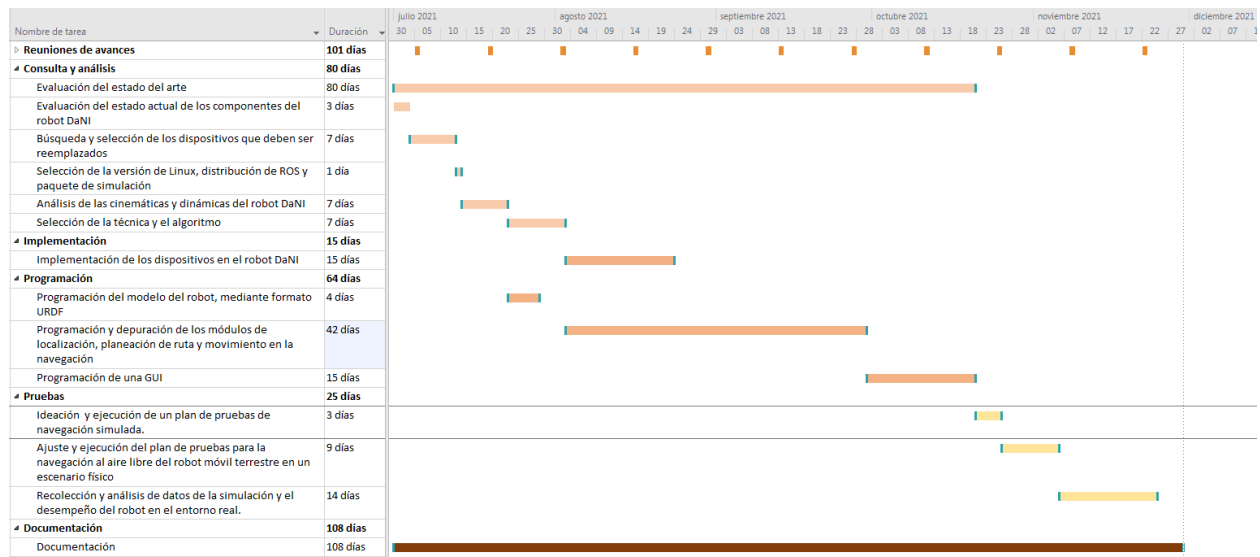


Figura 6.1. Cronograma del proyecto de grado (Elaboración propia)

## 7. RECURSOS

### 7.1. Recursos humanos

**Director: Alexander Martínez Álvarez:** Doctor en Automática y Robótica, Magister en Automática e Ingeniero electricista. El profesor Martínez está trabajando actualmente en el uso de técnicas de control no lineal para la navegación y el control sin colisiones de una flota de robots móviles (UAV y UGV). La aplicación actual de interés es la agricultura de precisión. Las contribuciones pasadas se han centrado en el modelado y control de robots móviles, tanto en términos de estabilización de actitud de robots aéreos, como el posicionamiento global de robots aéreos y terrestres. [44]

**Codirector: Juan David Contreras:**

Magíster en Ingeniería, e Ingeniero mecánico, apasionado por la enseñanza y el aprendizaje, con experiencia como profesor universitario en cursos de termodinámica, mecatrónica, automatización y máquinas-herramientas. Dedicado desde 2014 a la investigación y desarrollo en temas como la industria 4.0, IoT, inteligencia artificial aplicada a manufactura y enseñanza en ingeniería. [45]

**Asesor: Juan David Hernández Vega:**

PhD en Robótica de la Universidad de Girona. Ingeniero de investigación experimentado con un historial demostrado de trabajo en la industria de la investigación, con experiencia en planificación y mapeo de movimiento. Experto en C/C++, Python, Robot Operating System (ROS) y otros marcos y bibliotecas de desarrollo robótico. Su actividad investigadora se centra en algoritmos de planificación de movimiento para robots terrestres, aéreos y submarinos, así como para aplicaciones de colaboración humano-robot. [46]

## 7.2. Recursos técnicos

**Computador 1.** Intel Core i3 - 6006U. CPU @2Ghz 1.99Ghz. - 64 bits 8Gb de memoria Ram instalada. Windows 10. Home Single Language - Linux 18.04 LTS Almacenamiento 250GB SSD Tarjeta gráfica Intel HD Graphics 520

**Computador 2** Intel Core i7 - 7500U CPU @ 2.70GHz 2.90 GHz - 64 bits 8Gb de memoria Ram instalada. Windows 10. Home Single Language - Linux 18.04 LTS Almacenamiento 1TB HHD Tarjeta gráfica Radeon R7 M445.

## 7.3. Presupuesto

En la Tabla 2, se presenta el presupuesto para los recursos humanos.

Tabla 2. Presupuesto de recursos humanos				
Descripción	Número de horas	Costo de hora	Fuente	
			Universidad	Estudiantes
<b>Director</b>	33	\$ 84.315	\$ 2.782.395	
<b>Codirector</b>	33	\$ 84.315	\$ 2.782.395	
<b>Asesor</b>	15	\$ 84.315	\$ 1.264.725	
<b>Estudiante 1</b>	533	\$ 6.250		\$ 3.331.250
<b>Estudiante 2</b>	533	\$ 6.250		\$ 3.331.250
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 6.829.515</b>	<b>\$ 6.662.500</b>
			<b>\$ 13.492.015</b>	

De igual forma se presentan los rubros asociados a los materiales y recursos tecnicos usados en el proyecto, como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Presupuesto recursos técnicos				
Descripción	Tipo	Cantidad	Fuente	
			Universidad	Estudiantes
Computador 1	Equipo	1		\$ 1.800.000
Computador 2	Equipo	1		\$ 2.600.000
Monitor	Equipo	1		\$ 400.000
Mouse	Equipo	1		\$ 20.000
Teclado	Equipo	1		\$ 40.000
Linux	Software	2	N/A	N/A
ROS	Software	2	N/A	N/A
Robot Kit NI DaNI	Hardware	1	\$ 4.410.000	
Instrumentación y sensores	Hardware	3	\$ 750.000	
Tarjeta de desarrollo	Hardware	1	\$ 700.000	
Reserva de riesgos	75% del valor del Hardware		\$ 1.087.500	
TOTAL			\$ 6.947.500	\$ 4.860.000
			\$ 11.807.500	

## REFERENCIAS

- [1] Camilo Andres Barrera, “Presente y futuro de la robótica industrial en colombia,” Reportero Industrial, <https://www.reporteroindustrial.com/temas/Presente-y-futuro-de-la-robotica-industrial-en-Colombia+120872?pagina=2> (Accessed Apr 24 2021).
- [2] J. C. Correa, “Approaches to the future of robotics in Colombia,” *Lámpsakos*, vol. 1, no. 17, pp. 9–12, 2017. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6551483.pdf>
- [3] X. Zhang, W. Zhang, and Y. Gao, “Construction of Environmental Map Based on Lidar Based Tracking System,” in *Proceedings of 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, IMCEC 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., oct 2019, pp. 916–919.
- [4] National Instruments Corp, “Los beneficios de la programación gráfica en ni labview - ni,” Innovations, <https://www.ni.com/es-co/innovations/white-papers/13/benefits-of-programming-graphically-in-ni-labview.html> (Accessed Apr 06 2021).
- [5] N. I. Jaksic, “DaNI-K: A vision-based robot control experiment with a dani robot and kinect sensor bundle,” *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2013.
- [6] M. Looney, “Inertial Sensors Facilitate Autonomous Operation in Mobile Robots,” *Analog Dialogue 44-11*, p. 1, 2010. [Online]. Available: [www.analog.com/analogdialogue](http://www.analog.com/analogdialogue)
- [7] Comunicación Eadic, “El triunfo de ros como el sistema operativo estándar en robótica,” Blog, <https://www.eadic.com/el-triunfo-de-ros-como-el-sistema-operativo-estandar-en-robotica/> (Accessed Apr 06 2021).
- [8] Amanda Dattalo, “Ros/introduction - ros wiki,” Introduction, <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (Accessed Apr 24 2021).
- [9] P. Corke, “Integrating ROS and MATLAB [ros topics],” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 22, no. 2, pp. 18–20, 2015.
- [10] A. Araújo, D. Portugal, M. S. Couceiro, J. Sales, and R. P. Rocha, “Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ROS,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, vol. 11, no. 3, pp. 315–326, 2014.
- [11] Open Robotics, “Ros/introduction - ros wiki,” Why ROS?, <https://www.ros.org/is-ros-for-me/> (Accessed Apr 24 2021).
- [12] Ricardo Tellez, “Using ros for reproducible robotics results - webcast,” RoboBusiness Direct Upcoming Sessions, <https://robobusinessdirect.com/robobusiness-direct-agenda/> (Accessed Apr 24 2021).
- [13] S. A. Madrigal Moreno and N. D. Muñoz Ceballos, “Vehículos de guiado autónomo (AGV) en aplicaciones industriales: una revisión,” *Revista Politécnica*, vol. 15, no. 28, pp. 117–137, 2019.
- [14] H. D. Quang, T. N. Manh, C. N. Manh, D. P. Tien, M. T. Van, D. H. T. Kim, N. T. Thanh Van, and D. H. Duan, “Mapping and Navigation with Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot based on Robot Operating

- System,” *Proceedings of the 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering, MorSE 2019*, no. December, pp. 54–59, 2019.
- [15] Programa Omicas, “Fenómica,” Proyectos, <https://www.omicas.co/proyectos/fenomica> (Accessed Jul 30 2021).
- [16] X. Wang, Y. Sun, Q. Du, D. Wang, and D. Wu, “AN INTEGRATED GNSS REMOTE SENSING INSTRUMENT AND ITS FIRST GNSS R AIRBORNE EXPERIMENT,” *IGARSS 2016*, pp. 4827–4830, 2016.
- [17] K. W. Park, J. W. Suh, B. S. Seo, M. J. Lee, and C. Park, “Design of signal acquisition and tracking process based on multi-thread for real-time GNSS software receiver,” *Proceedings of 2016 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2016*, 2016.
- [18] J. D. Q. Guerra, “Dotación de la Capacidad de Localización y Mapeo Simultáneo Indoor a un Robot Móvil Terrestre Usando Sensores IMU y LIDAR Sobre el Framework ROS,” Trabajo fin de máster, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://catalogo.escuelaing.edu.co/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=21798>
- [19] D. Ruiz and P. Rizo, “Planeación de trayectorias para un robot aéreo AR.Drone 2.0 usando GPS,” Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2014. [Online]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16515/RizoGonzalezPedroFelipe2014.pdf?sequence=1>
- [20] A. S. Andrade and D. R. Patiño, “Navegación autónoma de un quadrotor en entornos interiores mediante SLAM monocular,” Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2014. [Online]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co:8443/handle/10554/16521>
- [21] R. L. Guimarães, A. S. de Oliveira, J. A. Fabro, T. Becker, and V. A. Brenner, “ROS navigation: Concepts and tutorial,” *Studies in Computational Intelligence*, vol. 625, no. February, pp. 121–160, 2016.
- [22] B. Crnokić, “Use of artificial neural networks for fusion of infrared and vision sensors in a mobile robot navigation system,” *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, vol. 31, no. 1, pp. 80–87, 2020.
- [23] G. G. Fonseca De la Hoz, “Diseño e implementación de una estrategia para mejorar la precisión en la medida de posición de una flota de robots.” 2018. [Online]. Available: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/10682>
- [24] C. G. Miguélez Machado, I. O. Benítez González, A. M. Rivera Rivera, and V. Moreno Vega, “Implementación de sistema operativo robótico en una plataforma de robot móvil,” *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ISSN: 1815-5928*, vol. 41, no. 3, pp. 79–92, 2020.
- [25] D. A. Solarte, “Desarrollo de un AGV modular para la integración de sistemas de manufactura,” Trabajo de grado, Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2020. [Online]. Available: [http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/13821/Desarrollo\\_AGV\\_Modular.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://vitela.javerianacali.edu.co/bitstream/handle/11522/13821/Desarrollo_AGV_Modular.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [26] M. Quigley, B. Gerkey, and W. D. Smart, *Programming Robots with ROS A Practical Introduction to the Robot Operating System*, 2015, vol. 53.
- [27] Open Source Robotics Foundation, “Why gazebo?” Gazebo, Robot simulation made easy., <http://gazebosim.org/> (Accessed Apr 06 2021).

- [28] D. D. Tenorio, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA EL MAPEO Y NAVEGACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL,” Trabajo de grado, Universidad Autonoma de Occidente, Cali, Colombia, 2017. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/9994/T07658.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] S. A. Vivas, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN APRENDIZAJE AUTOMÁTICO QUE FACILITE LA PERCEPCIÓN ROBÓTICA DEL ENTORNO POR MEDIO DE SENSORES LÁSER,” Trabajo de grado, Universidad Autonoma de Occidente, Cali, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10526/T08198.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- [30] M. A. Post, A. Bianco, and X. T. Yan, “Autonomous navigation with ROS for a mobile robot in agricultural fields,” *ICINCO 2017 - Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, vol. 2, no. Icinco, pp. 79–87, 2017.
- [31] I. Conde, “Sistema de navegación para navegación para robot holonomico,” Trabajo de grado, Universidad POLitecnica de Madrid, Madrid, España, 2018. [Online]. Available: [http://oa.upm.es/50487/1/TFG\\_IVAN\\_CORDERO\\_CONDE.pdf](http://oa.upm.es/50487/1/TFG_IVAN_CORDERO_CONDE.pdf)
- [32] D. Bongiovanni, Costamagna, “Desarrollo e Implementación de un Sistema de Tracción y Dirección en Prototipo de Robot Desmalezador,” Trabajo de grado, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, 2020. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/417623137/Desarrollo-e-Implementacion-de-un-Sistema-de-Traccion-y-Direccion-en-Prototipo-de-Robot-Desmalezador>
- [33] G. A. Acosta Amaya, “SLAM Monocular en Tiempo Real,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/93944/TFG-2243-MACEDAGARCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] K. E. G. Paniagua and S. J. Salazar, “Sistema de navegación autónomo guiado mediante generación de trayectorias para un robot móvil en entorno controlado,” Trabajo de grado, Universidad EIA, Cali, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2538>
- [35] A. Newman, G. Yang, B. Wang, D. Arnold, and J. Saniie, “Embedded mobile ros platform for slam application with rgb-d cameras,” in *2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2020, pp. 449–453.
- [36] D. Uribe and F. M. José, “Diseño de sistema de planeación y seguimiento de rutas en un escenario interior con un robot móvil,” Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/45621%0Ainternal-pdf://229/45621.html>
- [37] H. D. Quang, T. N. Manh, C. N. Manh, D. P. Tien, M. T. Van, D. H. T. Kim, V. N. T. Thanh, and D. H. Duan, “Mapping and navigation with four-wheeled omnidirectional mobile robot based on robot operating system,” in *2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*, 2019, pp. 54–59.
- [38] J. M. Correa Sandoval and M. A. Díaz Zapata, “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PERCEPCIÓN PARA DETECCIÓN DE CARRIL Y GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA VEHÍCULOS AUTÓNOMOS,” Trabajo de grado, Universidad Autonoma de Occidente, Cali, Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11599/T08772.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

- [39] D. P. Lancheros and A. F. Gómez, “Control reactivo de un vehiculo autónomo terrestre,” Trabajo de grado, Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2014. [Online]. Available: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/7137>
- [40] D. C. España and S. Sanchez, “COBERTURA DE ÁREAS POR MEDIO DE LA INTERACCIÓN DE UNA FLOTA DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS,” Trabajo de grado, Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2015. [Online]. Available: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/4099>
- [41] C. España, S. Sanchez, and M. Alexander, “Modelamiento y control por modos deslizantes de un robot no holonómico,” *El hombre y la Maquina*, no. 49, pp. 122–131, 2016. [Online]. Available: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/4099>
- [42] E. D. Rivera and S. Páez Campo, “Diseño e implementación de una unidad de supervisión y control para una flota de robots UGV,” Trabajo de grado, Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2020. [Online]. Available: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/12649>
- [43] Mellado, Martin, “Rmóvil - cinemática - diferencial — — upv. (oct 19, 2017),” Accessed: Apr 06, 2021. [Online Video] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=SirC01o7kx8>.
- [44] P. U. Javeriana, Cali, “Alexander martinez,” Profesores, <https://www.javerianacali.edu.co/profesores/alexander-martinez-alvarez> (Accessed Apr 24 2021).
- [45] P. U. Javeriana Cali, “Centro de automatizacion de procesos,” Talento Humano, <https://www2.javerianacali.edu.co/laboratorios/centro-de-automatizacion-de-procesos/talento-humano#gsc.tab=0> (Accessed Apr 24 2021).
- [46] J. D. Hernández, “Juan david hernández vega,” LinkedIn, <https://www.linkedin.com/in/juandhv/> (Accessed Apr 24 2021).