



GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada

Curso académico 20xx-20xx

Trabajo Fin de Grado

Escribe el título del trabajo aquí
con la segunda línea aquí

Tutor: Julio Vega Pérez
Autor: Julia López Augusto



Este trabajo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional CC BY-NC-SA International License (Creative Commons AttributionNonCommercial-ShareAlike 4.0). Usted es libre de *(a) compartir*: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato; y *(b) adaptar*: remezclar, transformar y crear a partir del material. El licenciador no puede revocar estas libertades mientras cumpla con los términos de la licencia:

- *Atribución.* Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatante.
- *No comercial.* Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.
- *Compartir igual.* Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

Agradecimientos

Primero de todo me gustaría agradecer a mi tutor Julio toda la confianza y el apoyo depositado para poder hacer posible este proyecto. Sin ti nada de esto hubiera sido posible.

También agradecer a todos los profesores que he tenido a lo largo de la carrera lo importante que habéis sido para mí tanto en mi crecimiento académico, profesional como personal. Gracias a vosotros me habéis hecho ingeniera.

Otras personas que han sido, son y serán fundamentales en mi vida son mis padres; a los cuáles estaré eternamente agradecida por no soltarme nunca de la mano y darme todas las herramientas que han hecho posible ser quien soy hoy en día. Os quiero muchísimo.

Una persona que apareció en mi vida hace ya unos 7 años fue Fran, quien trajo luz en medio de tanta oscuridad y ha sido el mejor acompañante, amigo y amante de cada aventura que se presenta en la vida. Te amo con todo mi corazón y gracias de verdad por todo, ya lo sabes.

Los abuelos deberían ser eternos pero desgraciadamente en mi caso marcharon mucho antes de lo debido. Sé que les encantaría ver a su nieta graduada como ingeniera y me encantaría poder darles un abrazo muy fuerte y poder celebrarlo juntos pero bueno, sé que allá donde estéis estaréis muy orgullosos mí tanto como yo os echo de menos a vosotros. Gracias por los años que pude conocerlos y disfrutarlos, quedarán para siempre en mi retina.

Los amigos son la familia que uno puede elegir y hoy en día puedo estar muy orgullosa y agradecida de la gente que tengo a mi lado. Gracias a Jimena, Elisa, Sofía, Maryu, Santi, Gonzalo y Álvaro por ser tan maravillosos y por estar ahí estos 4 años de alegrías, lloros, mucho trabajo y dolores de cabeza; sois increíbles.

*A mi misma;
por nunca tirar de la toalla*

Chozas de Canales, 4 de Junio de 2024

Julia López Augusto

Resumen

Escribe aquí el resumen del trabajo. Un primer párrafo para dar contexto sobre la temática que rodea al trabajo.

Un segundo párrafo concretando el contexto del problema abordado.

En el tercer párrafo, comenta cómo has resuelto la problemática descrita en el anterior párrafo.

Por último, en este cuarto párrafo, describe cómo han ido los experimentos.

Acrónimos

SRI *Stanford Research Institute*

KUKA *Keller und Knappich Augsburg*

ABB *Asea Brown Boveri*

BSA *Backtracking Spiral Algorithm*

FLL *First Lego League*

AGV *Automatic Guided Vehicles*

AMR *Autonomous Mobile Robots*

MITMA *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*

CEDEX *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*

AEC *Asociación Española de la Carretera*

ACEX *Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras*

SIG *Sistema de Información Geográfica*

IA *Inteligencia Artificial*

GPS *Global Positioning System*

DANA *Depresión Aislada en Niveles Altos*

CAD *Computer-Aided Design*

PDCA *Plan Do Check Act*

CSI *Camera Serial Interface*

UART *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*

PWM *Pulse Width Modulation*

LTS *Long Time Support*

ROS *Robot Operating System*

CLI *Command Line Interface*

YOLO *You Only Look Once*

RCE *Red de Carreteras del Estado*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La robótica	1
1.1.1. Robots industriales	4
1.1.2. Robots de servicio	5
1.2. Robots de campo	8
1.3. Robots de bajo coste	9
1.4. Conservación de carreteras en España	12
2. Estado del arte	16
3. Objetivos	24
3.1. Descripción del problema	24
3.2. Requisitos	25
3.3. Competencias	26
3.3.1. Competencias empleadas	26
3.3.2. Competencias adquiridas	27
3.4. Metodología	28
3.5. Plan de trabajo	28
4. Plataforma de desarrollo	31
4.1. Hardware	31
4.1.1. Raspberry Pi 4	31
4.1.2. Raspberry Pi cámara	32
4.1.3. GPS NEO 6M	32
4.1.4. Sevomotor Estándar Parallax	33
4.1.5. Ruedas ActivityBot	34
4.1.6. Google Coral USB	34
4.1.7. Power bank	35
4.1.8. Rueda loca	36

4.1.9. Ordenador principal	36
4.2. Software	37
4.2.1. FreeCAD	37
4.2.2. Python	38
4.2.3. OpenCV	39
4.2.4. Ubuntu	40
4.2.5. ROS 2	41
4.2.6. Gazebo	43
4.2.7. Herramientas de monitorización	43
4.2.8. Google Colaboratory	44
4.2.9. YOLOv8	45
4.2.10. TensorFlow Lite	45
4.2.11. Interfaz Web	46
5. Implementación hardware del robot	47
5.1. Geometría del robot	47
5.2. Elección de componentes hardware	48
5.2.1. Raspberry Pi	48
5.2.2. Servomotores Parallax	48
5.2.3. Ruedas ActivityBot	49
5.2.4. Rueda/Bola Loca	49
5.2.5. Raspberry Pi Cámara	49
5.2.6. GPS NEO 6M	49
5.2.7. Google Coral USB	49
5.2.8. Powerbank	49
5.3. Bocetos	49
5.4. Diseño CAD	49
5.4.1. Pieza base	49
5.4.2. Pieza cámara	50
5.4.3. Pieza sujeción trasera	50
5.4.4. Pieza batería	50
5.5. Impresión y montaje	50
5.6. Snippets	51
5.7. Verbatim	51
5.8. Ecuaciones	52
5.9. Tablas o cuadros	52

5.10. Segunda sección	53
5.10.1. Números	53
5.10.2. Listas	53
6. Conclusiones	55
6.1. Conclusiones	55
6.2. Corrector ortográfico	56
Bibliografía	57

Índice de figuras

1.1.	Ingenios de la antigüedad con fines religiosos	2
1.2.	Ingenios de la antigüedad con fines no religiosos	2
1.3.	Electro y Sparko	3
1.4.	Algunos robots del siglo XX	4
1.5.	Robots industriales	5
1.6.	Robots de limpieza Roomba, de iRobot ⁶	6
1.7.	Robótica enfocada al entretenimiento	7
1.8.	Robots de salud	7
1.9.	Robots de logística	8
1.10.	Robots de campo	9
1.11.	Mano Antropomórfica Híbrida Rígida y Suave	10
1.12.	Clasificación de deterioros	13
1.13.	Agrietamiento	14
1.14.	Degradación del material de la capa de rodadura	14
1.15.	Deformación de la capa de rodadura sin degradación de material	15
1.16.	Otro tipo de daños	15
2.1.	Robot usado para la reconstrucción 3D de baches	17
2.2.	Proyecto HERON	18
2.3.	Visualización de la señal en un mapa en eyesNroad	19
2.4.	Plataforma robótica diseñada para el sellado de grietas	20
3.1.	Método PDCA	29
4.1.	Raspberry Pi 4 ³⁵	32
4.2.	Raspberry Pi Cámara V2 ³⁶	33
4.3.	Módulo GPS NEO 6M ³⁷	33
4.4.	Servomotor Parallax ³⁸	34
4.5.	Rueda ActivityBot ³⁹	34
4.6.	Google Coral USB ⁴⁰	35

4.7. Xiaomi Powerbank ⁴¹	35
4.8. Rueda loca ⁴²	36
4.9. ASUS VivoBook 14 ⁴³	37
4.10. Logo de Freecad ⁴⁴	38
4.11. Logo de Python ⁴⁵	39
4.12. Logo de OpenCV ⁴⁶	40
4.13. Logo de Ubuntu ⁴⁷	40
4.14. Distribuciones de ROS 2 usadas	42
4.15. Logo de Gazebo ⁵³	43
4.16. Logo de Rviz ⁵⁴	43
4.17. Logo de Google Colab ⁵⁷	44
4.18. Logo de YOLOv8 ⁵⁸	45
4.19. Logo de TensorFlow Lite ⁵⁹	45
4.20. Logo de Open Street Maps ⁶¹	46
5.1. Robot aspirador Roomba de iRobot.	53

Listado de códigos

5.1. Función para buscar elementos 3D en la imagen	51
5.2. Cómo usar un Slider	51

Listado de ecuaciones

5.1. Ejemplo de ecuación con fracciones	52
5.2. Ejemplo de ecuación con array y letras y símbolos especiales	52

Índice de cuadros

2.1. Ventajas y desventajas de los métodos de detección de baches	22
4.1. Especificaciones técnicas del ordenador usado	37
4.2. Diferencias entre Ubuntu 20.04 y Ubuntu 22.04	41
5.1. Parámetros intrínsecos de la cámara	52

Capítulo 1

Introducción

La motivación nos impulsa a comenzar y el hábito nos permite continuar

Jim Ryun

La robótica ha sufrido una transformación enorme a lo largo de su historia, aunque siempre teniendo en mente el mismo objetivo: cumplir con el deseo humano. Debido a esa transformación y ese deseo se ha podido consolidar este campo en la actualidad, que abarca cada sector que se pueda imaginar. Otra vertiente que ha destacado en la robótica estos últimos años ha sido la creación de robots de bajo coste para que puedan llegar a un mayor número de personas y se puedan beneficiar de esta ciencia.

En el presente capítulo se va a abordar el contexto de la robótica, explicando brevemente su historia para poder entender realmente qué es la robótica y lo que es un robot. También se van a encuadrar los tipos de robots que existen y sus múltiples aplicaciones. Todo esto nos ayudará a poder entender mejor dónde se encuadra el presente trabajo, proporcionando los conocimientos necesarios, tanto teóricos como prácticos, que se describirán a lo largo del documento.

1.1. La robótica

La robótica es el campo de la ingeniería que se enfoca en el diseño, la construcción y la programación de robots. Y un robot se podría definir como un sistema informático formado por sensores y actuadores imprecisos, ya que operan en el mundo real que es imperfecto también. Los robots realizan tareas repetitivas, aburridas y peligrosas, y tienen que ser sensibles al entorno. Sin embargo, no existe una definición unívoca al respecto y depende del campo y de la época de la que queramos hablar. Para poder entenderlo, se va a hacer un breve resumen sobre la historia de la robótica.

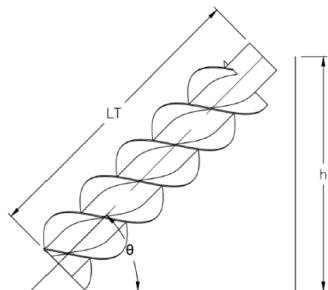
Desde la antigüedad se han desarrollado ingenios o autómatas, de los cuales muchos de ellos tenían fines religiosos, como los mostrados en la Figura 1.1.

Estatuas de Memnon ¹Guerreros de Terracota ²

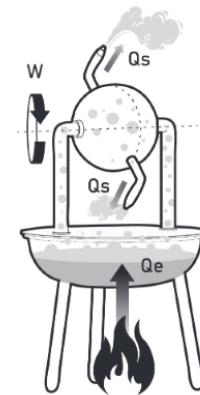
Figura 1.1: Ingenios de la antigüedad con fines religiosos

Otras invenciones que destacaban por otras aplicaciones fueron el tornillo de Arquímedes de Siracusa, la eolípila de Herón de Alejandría, el ornitóptero de Leonardo Da Vinci y el hombre de palo de Juanelo Turriano, entre otras.

En [Cuenca Sánchez et al., 2023] se trata el principio de generación hidroeléctrica, tomando en cuenta el modelo tornillo de Arquímedes. También en el artículo [Giri, 2020] se traza una línea histórica de las máquinas térmicas, teniendo en cuenta a la eolípila. Dichas invenciones aparecen reflejadas en la Figura 1.2.



Tornillo de Arquímedes



Eolípila

Figura 1.2: Ingenios de la antigüedad con fines no religiosos

Durante el siglo XX la ciencia dejó de ser una actividad desarrollada en aislamiento y se desarrolló en laboratorios con más gente. El movimiento del positivismo lógico

¹https://es.wikipedia.org/wiki/Colosos_de_Memn%C3%B3n

²https://es.wikipedia.org/wiki/Guerreros_de_terracota

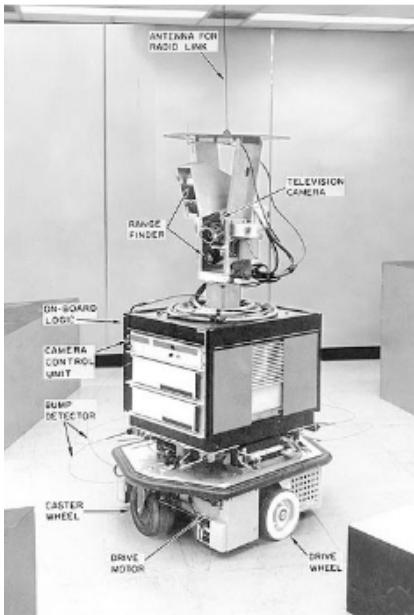
fomentó las investigaciones, ya que este movimiento trataba de dar importancia a la ciencia y dejar de lado la filosofía; también, el contexto de las guerras mundiales y de las bombas nucleares influyeron significativamente en este aspecto. Ya se empieza a acuñar la palabra robot y surge Electro y Sparko de Westinghouse Electric Corporation (Figura 1.3), tratado en muchas ocasiones como uno de los primeros robots, como se describe en [Bidaud, 2017]. Un descubrimiento muy destacado fue, y sigue siendo hoy en día, la Leyes de la Robótica de Isaac Asimov, así lo transmite [Barceló, 2004].



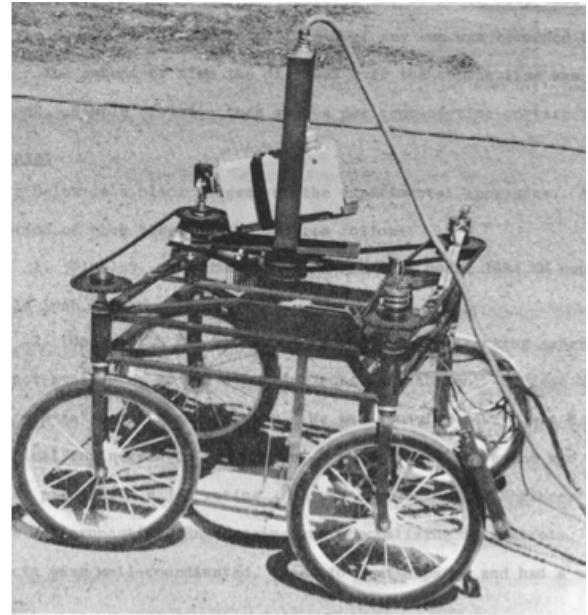
Figura 1.3: Electro y Sparko

[Nilsson et al., 1984] nos cuenta que en 1969 se construye por el *Stanford Research Institute* (SRI) Internacional un prototipo experimental llamado Shakey, que era una unidad independiente de un metro y medio, equipado con dos motores, cámara de televisión y una radio conectada a un ordenador, capaz de navegar en entornos cerrados y estructurados de una forma autónoma. Sus objetivos eran aprender del medio y ser capaz de planificar trayectorias de movimiento, y las tareas que le asignaron fueron mover y detectar bloques. Sin embargo, cada movimiento podría tardar más de una hora en computarse y, aún así, podrían producirse fallos. A Shakey se le conoce como el primer robot móvil (Figura 1.4 izquierda).

Otro robot muy conocido y descrito en [Earnest, 2012] es la carreta de Stanford, que era capaz de ver y moverse en cualquier ambiente. Con la cámara que disponía, era capaz de calcular y trazar distancias. Sin embargo, tardaba cinco horas en recorrer treinta metros (Figura 1.4 derecha).



Robot Shakey



Carreta de Stanford

Figura 1.4: Algunos robots del siglo XX

Ya a partir de la década de los 80 se decidió que el acceso a los robots fuese para todo el mundo, lo que provocó asombro, inquietud y miedo, ya que el desconocimiento suele generar rechazo. El mundo de la literatura y cine tampoco ayudaba en ese aspecto, ya que se presentaba al robot como algo perjudicial para la humanidad. Afortunadamente, esta situación va menguando con el tiempo, y se está consiguiendo ver a los robots como un asistente del ser humano que lo que quiere es mejorar su calidad de vida. Las dos grandes áreas de investigación centradas en tal propósito son la robótica industrial y la robótica de servicio, que veremos detalladamente a continuación.

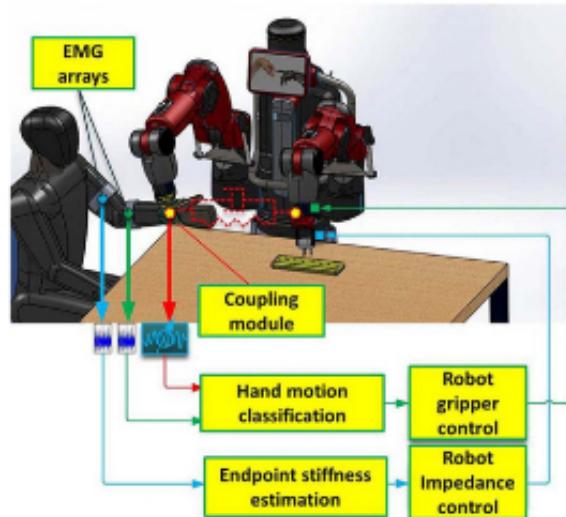
1.1.1. Robots industriales

Los robots industriales son, de forma resumida, brazos robotizados y manipuladores que tienen más de tres grados de libertad, trabajan en entornos controlados y usan efectores como: pinzas, ventosas, etc. Usan control por posición y planificación de trayectorias para poder controlar dichos brazos y poder realizar operaciones como *pick and place*, ensamblaje de piezas, entre otros. Una variante de los robots industriales

son los cobots: capaces de interactuar y colaborar con humanos como se describe en [El Zaatari et al., 2019] (Figura 1.5 izquierda). Dentro del mercado de los robots industriales se puede ver que tiene proveedores asentados como KUKA³ o ABB⁴.



Brazo robot ABB IRB 140⁵.



Cobot de [El Zaatari et al., 2019]

Figura 1.5: Robots industriales

1.1.2. Robots de servicio

Los robots de servicios son todos aquellos que no son industriales; por lo tanto, tienen menos de 3 grados de libertad, no trabajan en un entorno controlado, son más difíciles de programar, toman aplicaciones heterogéneas y todavía se encuentran en un mercado inmaduro. Existen muchos tipos de robots de servicio, de los cuales a continuación se enumeran algunos campos con algunos de sus respectivos ejemplos.

Robots de limpieza

En [Plaza, 2023] se define a los robots de limpieza como aquellos robots que se encargan de eliminar la suciedad. Dependiendo de sus características, pueden ser capaces de aspirar y fregar el suelo, o de limpiar los cristales de las ventanas. Estos últimos son comunes en edificios que tienen grandes ventanales y un difícil acceso a ellos. Las aspiradoras se encuentran en un mercado mundial asentado cuyos inicios eran aspiradoras que usaban sensores de contacto, encoders y una navegación pseudoaleatoria (Figura 1.6 izquierda), y han evolucionado hasta el punto de usar

³<https://www.kuka.com/es-es>

⁴<https://new.abb.com/es>

⁵<https://www.youtube.com/watch?v=BBrLA0r89KY>

mapas para poder navegar y poder localizarse. También usan algoritmos sofisticados, como navegación de cobertura por barridos sistemáticos BSA, y se componen de sensores más sofisticados, como láseres y cámaras, que son capaces de detectar obstáculos, como calcetines, y ser capaz de esquivarlos (Figura 1.6 derecha).



Modelo económico



Gama alta

Figura 1.6: Robots de limpieza Roomba, de iRobot⁶

Robots de entretenimiento

Son aquellos robots que tienen aplicaciones heterogéneas en un mercado educativo asentado, pero también existen muchos prototipos sin un uso comercial claro. En educación se ha ido introduciendo la robótica de manera muy atractiva y didáctica a los estudiantes hasta el punto de conseguir tener una asignatura destinada a la robótica y poder participar en competiciones como: *First Lego League* (FLL)⁷, Robocup Junior⁸ y Robocampeones⁹, entre otros (Figura 1.7 izquierda). En dicha asignatura se adquieren conocimientos generales de programación, impresión 3D, lógica, introducción a la electrónica y los microcontroladores.

Los prototipos nombrados anteriormente suelen ser demostradores tecnológicos que se crean para exhibiciones, se encuentran a la vanguardia de la tecnología y sirven para atraer un mayor número de clientes como puede ser: Spot de Boston Dynamics, Pepper de Softbank o Sophia de Hanson Robotics. En la Figura 1.7 (derecha) se pueden ver un ejemplo de estos demostradores.

⁶<https://www.irobot.es/>

⁷<https://firstlegoleague.soy/>

⁸<https://junior.robocup.org/>

⁹<https://sites.google.com/view/robocampeonesfuenlabrada/>

¹⁰<https://www.uclm.es/noticias/febrero2019/toledo/firstlegoleague>

¹¹<https://bostondynamics.com/products/spot/>

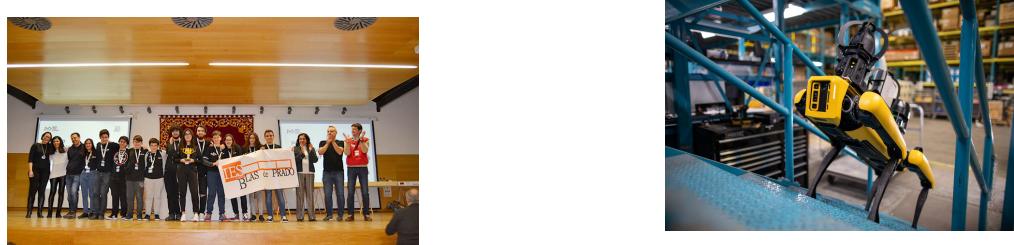
FLL Toledo ¹⁰Spot de Boston Dynamics ¹¹

Figura 1.7: Robótica enfocada al entretenimiento

Robots de salud

Los robots de salud sirven para mejorar la calidad de la atención médica y apoyar a los profesionales de la salud en diversas tareas. De esas tareas se pueden enumerar las siguientes: telepresencia, asistentes personales, cirugía, desinfección, esterilización, transporte interno y rehabilitación. De este gran abanico de tareas se puede destacar algunas aplicaciones que se puede ver en la Figura 1.8.

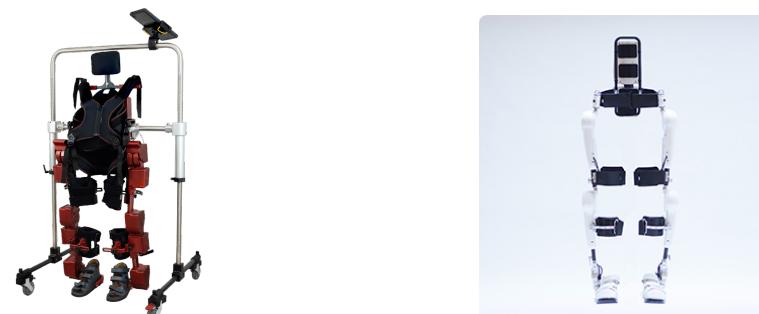
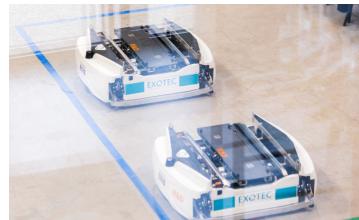
Robot Da Vinci ¹²Robot Mako ¹³Marsi Bionics ¹⁴CyberDyne ¹⁵

Figura 1.8: Robots de salud

Robots de logística

Los robots de logística son sistemas automatizados diseñados para mejorar la eficiencia, precisión y velocidad en la gestión de la cadena de suministro y operaciones logísticas en cadenas de montaje y almacenes. Generalmente, los sistemas automatizados son flotas de robots a las que se les aplica distintas arquitecturas software como puede ser AGV o AMR para poder realizar la tarea asignada. También existen prototipos de robots de reparto que son capaces de hacer entrega de última milla. La Figura 1.9 muestra ejemplos de robots de reparto.



Skypod de Exotec ¹⁶



Amazon Prime Air ¹⁷

Figura 1.9: Robots de logística

1.2. Robots de campo

En [Thorpe and Durrant-Whyte, 2003] se define a los robots de campo como la automatización de muchas plataformas terrestres, marítimas y aéreas en aplicaciones como la minería, la manipulación de carga, la agricultura, la exploración y explotación submarina, las carreteras, la exploración planetaria, la vigilancia costera y el rescate, entre otros. La robótica de campo se caracteriza por la aplicación de los principios robóticos más avanzados en cuanto a sensado, control y razonamiento en entornos no estructurados y difíciles. El atractivo de la robótica de campo es que es una ciencia desafiante, involucra los últimos principios de ingeniería y diseño de sistemas, y ofrece la verdadera posibilidad de que los principios robóticos hagan una contribución económica y social sustancial en muchas áreas de aplicación diferentes. En general, los robots de campo son plataformas móviles que trabajan al aire libre, a menudo produciendo interacciones fuertes con sus entornos, sin supervisión humana.

¹²<https://www.abexsl.es/es/sistema-robotico-da-vinci/que-es>

¹³<https://www.stryker.com/content/dam/stryker/joint-replacement/systems/mako-system-overview/resources>

¹⁴<https://www.marsibionics.com/>

¹⁵<https://www.cyberdyne.com/>

¹⁶<https://exotecbydexter.com/skypod/>

¹⁷<https://www.aboutamazon.es/noticias/innovacion/prime-air>

En los últimos años se ha podido notar un gran progreso en el desarrollo y la implementación de sistemas robóticos de campo. En la Figura 1.10 se pueden ver ejemplos al respecto. Por contra, debido a las condiciones que se tienen que someter estos robots, su coste es elevado e imposibilita que su uso se pueda extender a aquellos lugares que necesiten de su servicio y que tienen bajos recursos. Es por esto que existe la creciente necesidad de que, para ciertas aplicaciones que no tienen condiciones tan extremas, se creen robots asequibles que puedan lidiar con determinadas tareas. A continuación veremos este campo de investigación.



TX Robotic Strawberry Harvester¹⁸



FrontRunner
Autonomous Haulage System (AHS)¹⁹



Drone Tello²⁰



Perseverance²¹

Figura 1.10: Robots de campo

1.3. Robots de bajo coste

Los robots de bajo coste son aquellos robots diseñados y fabricados con el objetivo de ser económicos, accesibles y fáciles de producir. Estos robots suelen emplear componentes menos costosos y métodos de fabricación simplificados para reducir el precio final. Algunas características clave de los robots de bajo coste incluyen:

- *Componentes asequibles.* Utilizan materiales de propósito general y componentes

¹⁸<https://advanced.farm/technology/strawberry-harvester/>

¹⁹<https://www.komatsu.com/en/technology/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system/>

²⁰<https://www.ryzerobotics.com/es/tello>

²¹<https://es.wikipedia.org/wiki/Perseverance>

electrónicos más baratos, coordinados por alguna placa de bajo coste como Arduino o Raspberry Pi.

- *Simplicidad en el diseño.* Tienen diseños más sencillos que han sido creados usando técnicas de diseño e impresión 3D, facilitando su actualización y mantenimiento.
- *Accesibilidad.* Están diseñados para ser utilizados por cualquier tipo de persona, sin tener una formación avanzada de la materia.
- *Educación y prototipos.* Ampliamente usados en educación para facilitar el aprendizaje y también en la creación de prototipos rápidos y asequibles.
- *Versatilidad.* Se adaptan a numerosas aplicaciones, desde las más sencillas hasta proyectos más complejos.

En resumen, los robots de bajo coste permiten la democratización de la tecnología robótica, facilitando su acceso a un público más amplio y fomentando la innovación y el aprendizaje en diferentes campos. En la Figura 1.11 se puede apreciar una aplicación real reciente de la robótica de bajo coste de la universidad *Carnegie Mellon* descrita en el artículo [Shaw and Pathak, 2024].



Figura 1.11: Mano Antropomórfica Híbrida Rígida y Suave

Con esta base tecnológica, uno de los desafíos donde los robots de bajo coste están mostrando un gran potencial es en tareas repetitivas, como las tareas de mantenimiento,

por ejemplo de infraestructuras como las carreteras. A medida que se buscan soluciones más eficientes y económicas para mantener y mejorar las infraestructuras, los robots de bajo coste pueden ser una pieza clave en este proceso.

El mantenimiento de infraestructuras públicas, y en especial el de las carreteras, es una tarea de vital importancia para garantizar la seguridad y el bienestar de las personas. Sin embargo, también representa un reto logístico y económico significativo. Las carreteras, expuestas constantemente a condiciones climáticas adversas, tráfico pesado y el desgaste natural, requieren un mantenimiento constante para prevenir accidentes y asegurar la movilidad eficiente de personas y mercancías.

Tradicionalmente, este mantenimiento ha dependido de métodos manuales y laboriosos. Equipos de trabajadores inspeccionan las carreteras, identifican los daños y proceden a repararlos, lo que implica un alto coste en tiempo, recursos humanos y materiales. Además, la intervención en las carreteras conlleva cortes de tráfico que generan congestión y molestias tanto para conductores como para peatones.

Aquí es donde la tecnología de los robots de bajo coste puede ofrecer una solución disruptiva. El desarrollo de estos robots ha llegado a un punto en el que pueden ser integrados en el proceso de mantenimiento de carreteras de manera eficaz. Al ser equipados con actuadores, sensores avanzados y algoritmos de *Inteligencia Artificial* (IA), estos robots tienen la capacidad de detectar y arreglar automáticamente irregularidades en el pavimento, evaluando su tamaño y gravedad. Esta automatización permitiría realizar inspecciones más frecuentes y precisas, reduciendo el margen de error humano, facilitando intervenciones más rápidas y localizadas, y mejorando las condiciones de seguridad de los trabajadores.

La posibilidad de desplegar múltiples robots de bajo coste a lo largo de una red de carreteras también representa una ventaja significativa. Estos robots pueden realizar inspecciones de forma continua, recorriendo largas distancias y detectando problemas antes de que se conviertan en riesgos graves para la seguridad vial. Además, los robots pueden operar en entornos donde el acceso humano es complicado o peligroso, como en carreteras rurales o áreas montañosas.

En este contexto, la versatilidad y el bajo coste de los robots también resultan beneficiosos cuando se trata de reparaciones. Actualmente, las reparaciones suelen ser costosas y temporales, lo que significa que el mismo área puede requerir múltiples intervenciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, con robots capaces de aplicar reparaciones rápidas y precisas en el lugar y momento adecuados, se podría reducir la frecuencia de intervenciones costosas y prolongar la vida útil del pavimento.

Es por todo lo expuesto anteriormente que es necesario conocer la situación de las

carreteras en España, conocer qué tipos de deterioros existen, así como definir en cuál de todos se va a centrar este proyecto. De este modo, se podrá implementar soluciones innovadoras, como el uso de robots de bajo coste, que no solo optimicen los recursos, sino que también mejoren la seguridad vial y la sostenibilidad del sistema de carreteras a largo plazo.

1.4. Conservación de carreteras en España

Según informa el *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana* (MITMA)²² la red de carreteras de España tiene, a 31 de diciembre de 2023, 165.375 kilómetros, de los cuales 26.473 km forman la *Red de Carreteras del Estado* (RCE), que gestiona el MITMA y recoge el 52,5 % del tráfico total y el 64,57 % del tráfico pesado. Además, hay 71.145 km que están gestionados por las Comunidades Autónomas y soportan el 42 % del tráfico, y 67.770 km por las Diputaciones (que suponen el 5,5 % del tráfico restante).

España es uno de los países que tiene mayor número de kilómetros de carreteras, y es por ello que tienen que existir distintas entidades que se encarguen de supervisar su mantenimiento. Además de las expuestas previamente, hay varias organizaciones que juegan un papel destacado en la promoción, estudio y mejora continua de las infraestructuras viarias. El *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas* (CEDEX)²³, por ejemplo, es un organismo de referencia en la investigación y experimentación en el ámbito de las obras públicas y la movilidad. Fundado en 1957, el CEDEX trabaja para mejorar y conservar las infraestructuras, impulsar una movilidad segura y sostenible, y proteger el medioambiente.

Otra entidad relevante es la *Asociación Española de la Carretera* (AEC)²⁴, una entidad sin ánimo de lucro fundada en 1949, que trabaja en la defensa y promoción de las carreteras. La AEC se enfoca en aspectos como la seguridad vial, la sostenibilidad y la calidad de las infraestructuras, adaptando sus actividades a las necesidades y desafíos contemporáneos, como la digitalización y la descarbonización del transporte.

En el ámbito de la conservación propiamente dicha, la *Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras* (ACEX)²⁵, creada en 1995, agrupa a empresas dedicadas a la conservación de carreteras y se centra en promover la eficiencia y sostenibilidad en el mantenimiento de estas infraestructuras, así como en mejorar

²²<https://www.transportes.gob.es/carreteras/catalogo-y-evolucion-de-la-red-de-carreteras>

²³<https://www.cedex.es/presentacion>

²⁴<https://www.aecarretera.com/quienes-somos>

²⁵<https://www.acex.eu/la-asociacion/>

la seguridad vial y laboral. También es reseñable destacar sus premios anuales²⁶ que permiten avanzar a pasos agigantados en materia de conservación y seguridad vial.

Sin embargo, parece ser que la labor de todas estas plataformas no es suficiente. Noelia Soage²⁷, redactora en ABC Motor, cuenta que se estuvieron inspeccionando 13.000 kilómetros del total de la red de carreteras de España de las cuales, se presentan graves deterioros en más del 50%; los cuales pueden afectar a la estructura o a la superficie de la plataforma, comprometiendo la comodidad, eficiencia y seguridad de la circulación.

Para poder dar mayor contexto a los deterioros, es necesario hacer una clasificación de ellos sabiendo que se pueden presentar en pavimentos flexibles, semiflexibles y semirrígidos urbanos, y los podemos clasificar en cuatro grandes categorías: agrietamiento (Figura 1.13), degradación del material de la capa de rodadura (Figura 1.14), degradación de la capa de rodadura sin degradación de material (Figura 1.15) y otro tipo de daños (Figura 1.16). Todo está esquematizado en la Figura 1.12.

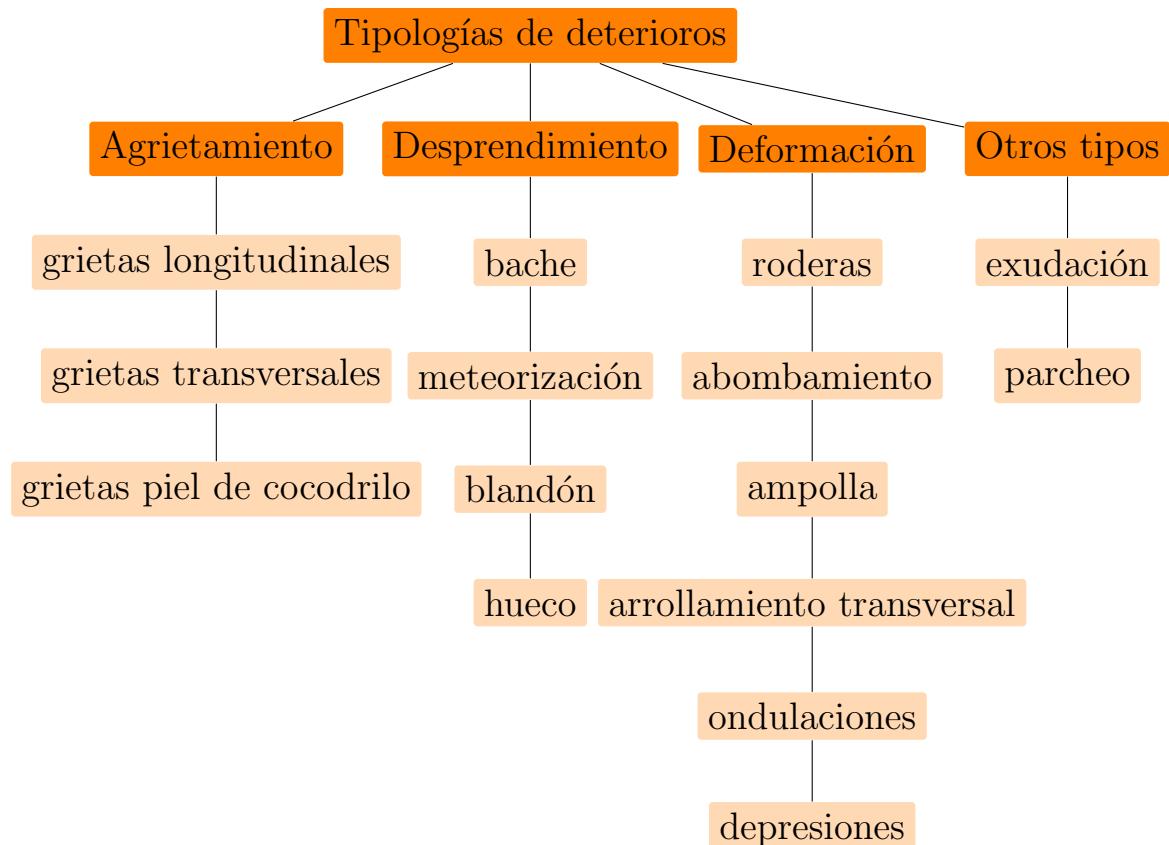


Figura 1.12: Clasificación de deterioros

²⁶<https://www.acex.eu/premios-acex/>

²⁷<https://www.abc.es/motor/reportajes/emisiones-accidentes-aumento-mal-estado-carreteras-senales-20230309230204-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

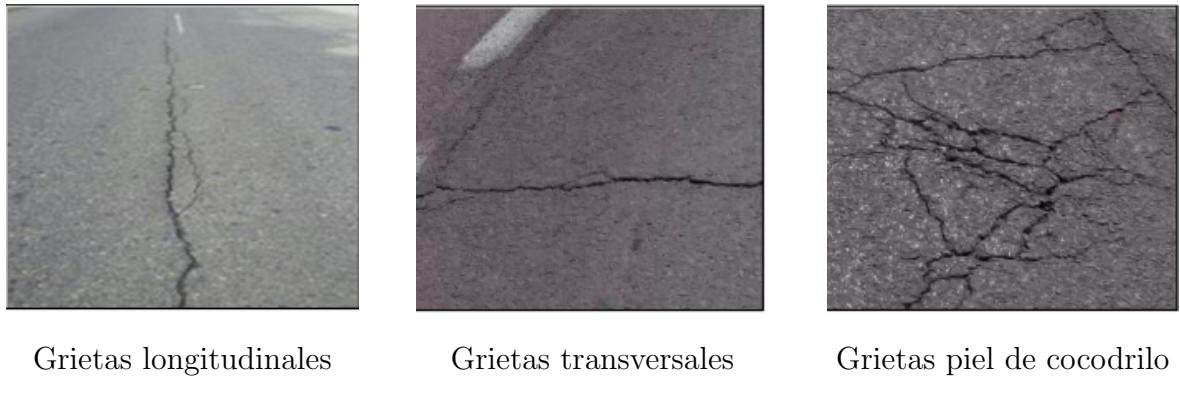


Figura 1.13: Agrietamiento

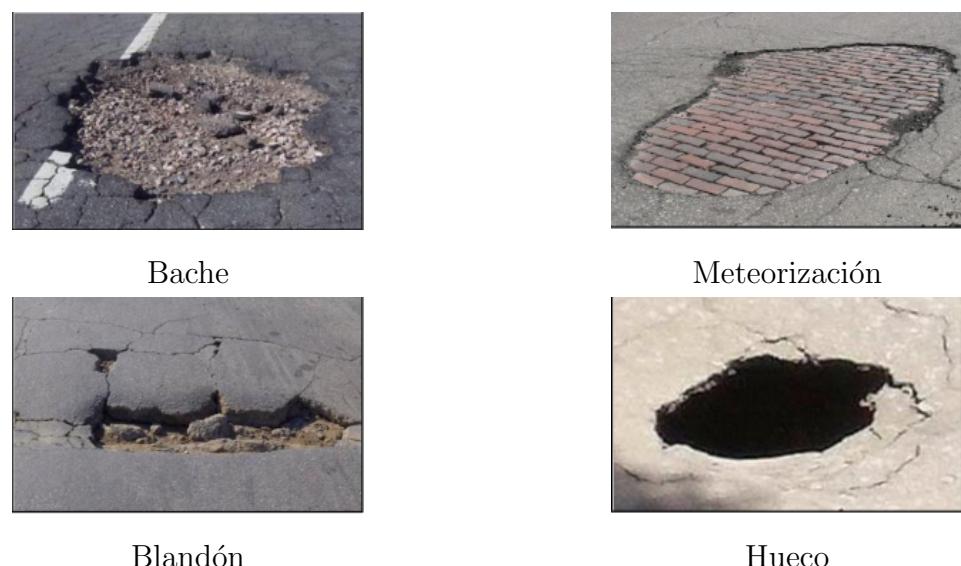


Figura 1.14: Degradación del material de la capa de rodadura

Tras haber mostrado los tipos de deterioros que existen, nos centramos en el mantenimiento de uno de ellos, ya que el problema es muy grande e intentar tratar todos los casos se torna inabordable para este proyecto. Así, de todos los tipos mostrados, se van a tratar los baches.

Una vez conocido el deterioro en que se va a centrar este proyecto, los organismos existentes en España y todas las oportunidades que un robot *low-cost* ofrece para el mantenimiento de carreteras, se puede decir que este proyecto se centra en el desarrollo de un robot de campo de tamaño compacto y bajo coste, diseñado para ser fácil de usar y controlar. El robot ha sido fabricado completamente mediante impresión 3D y está equipado con herramientas ampliamente utilizadas en el campo de la robótica.



Figura 1.15: Deformación de la capa de rodadura sin degradación de material



Figura 1.16: Otro tipo de daños

Esta combinación permite que cualquier persona, incluso sin un conocimiento profundo en robótica, pueda replicar el robot y ponerlo en funcionamiento. En el próximo capítulo, se presentarán diversos prototipos y futuras aplicaciones que guardan una cierta relación con el tipo de robot desarrollado.

Capítulo 2

Estado del arte

Todo progreso depende de la irracionalidad del hombre razonable.

George Bernard Shaw

En el presente capítulo se van a describir algunos de los prototipos y posibles aplicaciones más destacables sobre la detección y mantenimiento del pavimento de las carreteras usando inteligencia artificial y técnicas robóticas. En este estado del arte se revisan más de diez soluciones tecnológicas innovadoras desarrolladas recientemente.

Sistema de reconstrucción 3D de baches

Este sistema, explicado en [Bruno et al., 2023], es creado como parte del proyecto Infrarob²⁸ y desarrollado en el marco del proyecto europeo Horizon 2020, utiliza una *Raspberry Pi 4B* acoplada a un robot autónomo para capturar imágenes usando una cámara y coordenadas GPS, usando el módulo de baches en carreteras. Las imágenes, tomadas desde diferentes ángulos, son procesadas mediante técnicas fotogramétricas para generar modelos 3D de los baches, permitiendo calcular con precisión el volumen que debe ser rellenado. El sistema también integra un *Sistema de Información Geográfica* (SIG) para mejorar la gestión del mantenimiento de pavimentos. (Figura 2.1)

Las ventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Bajo coste.* Utiliza componentes de bajo coste como: *Raspberry Pi*, *Raspberry Pi Camera* y el módulo *GPS NEO-6M*, que también es *low-cost*.
- *Precisión en la detección.* Capacidad para detectar baches de hasta 75 cm de diámetro y crear modelos 3D precisos.
- *Integración con SIG.* Facilita la planificación de reparaciones.

²⁸<https://infrarobproject.com/>



Figura 2.1: Robot usado para la reconstrucción 3D de baches

Las desventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Limitaciones climáticas.* No puede operar en condiciones adversas ni durante la noche.
- *Uso de software de pago.* Utiliza *ContextCapture*, que es de pago, para el procesamiento fotogramétrico.
- *Movimiento circular para detección del volumen.* Una vez detectado el bache, es necesario moverse alrededor de él para que el algoritmo de fotogrametría sea capaz de encontrar su volumen, lo que ralentiza el cálculo.

El proyecto Herón

En [Katsamenis et al., 2022] se habla del Proyecto HERON²⁹ que también parte del programa Horizon 2020. Este proyecto propone una solución integral para el mantenimiento de infraestructuras viales mediante el uso de vehículos modulares robóticos autónomos y drones. El sistema está diseñado para optimizar la eficiencia y seguridad de las operaciones de mantenimiento, utilizando sensores y escáneres para crear mapas 3D, inteligencia artificial para coordinar flujos de trabajo, y módulos de análisis de imágenes para detectar defectos. Todavía está en etapa de desarrollo. (Figura 2.2)

Las ventajas de este proyecto son las siguientes:

²⁹<https://www.heron-h2020.eu/>

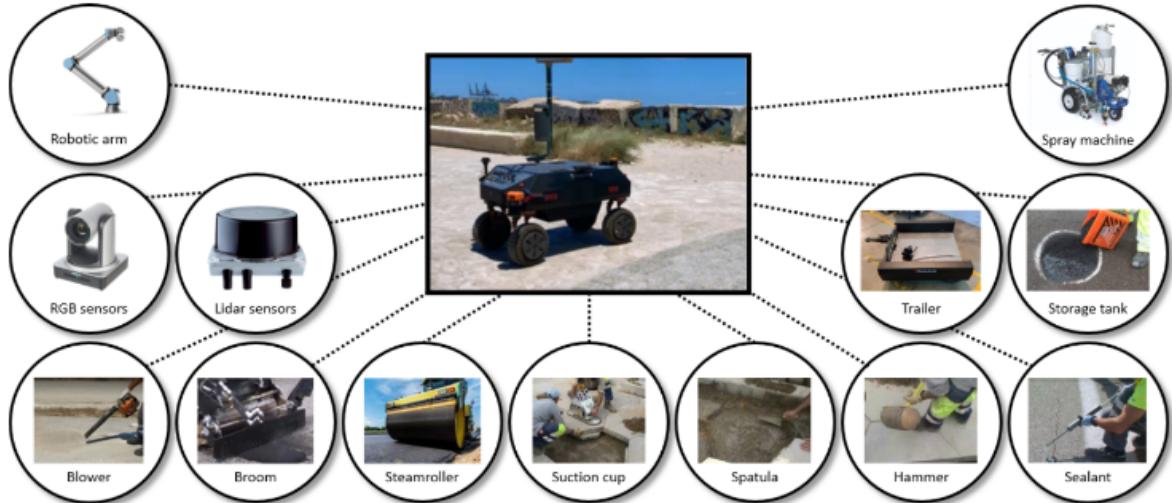


Figura 2.2: Proyecto HERON

- *Automatización completa.* Minimiza la intervención humana y reduce riesgos laborales.
- *Eficiencia.* El objetivo es mejorar la capacidad y eficiencia de las redes viales.
- *Intercambio de datos en tiempo real.* Otro de los objetivos es mejorar la toma de decisiones
- *Diseño modular.* Para poder maximizar sus capacidades, facilitar el transporte y reducir los costes de mantenimiento y accidentes.

Las desventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Coste inicial elevado.* La implementación de tecnologías avanzadas es costosa.
- *Dependencia tecnológica.* Requiere una infraestructura tecnológica robusta para su funcionamiento.

EyesNroad

EyesNroad es una plataforma que emplea IA y *Machine Learning* para identificar baches, señalización y otros deterioros en carreteras a partir de videos capturados por cámaras georreferenciadas instaladas en vehículos. La plataforma genera inventarios detallados y reportes del estado de las carreteras, facilitando el control y mantenimiento de las mismas. Esta aplicación ha sido desarrollada para participar en los XX premios

de conservación de carreteras de ACEX (año 2024)³⁰, que ha resultado ganadora en la en la categoría general. Se puede ver su aspecto en la Figura 2.3.

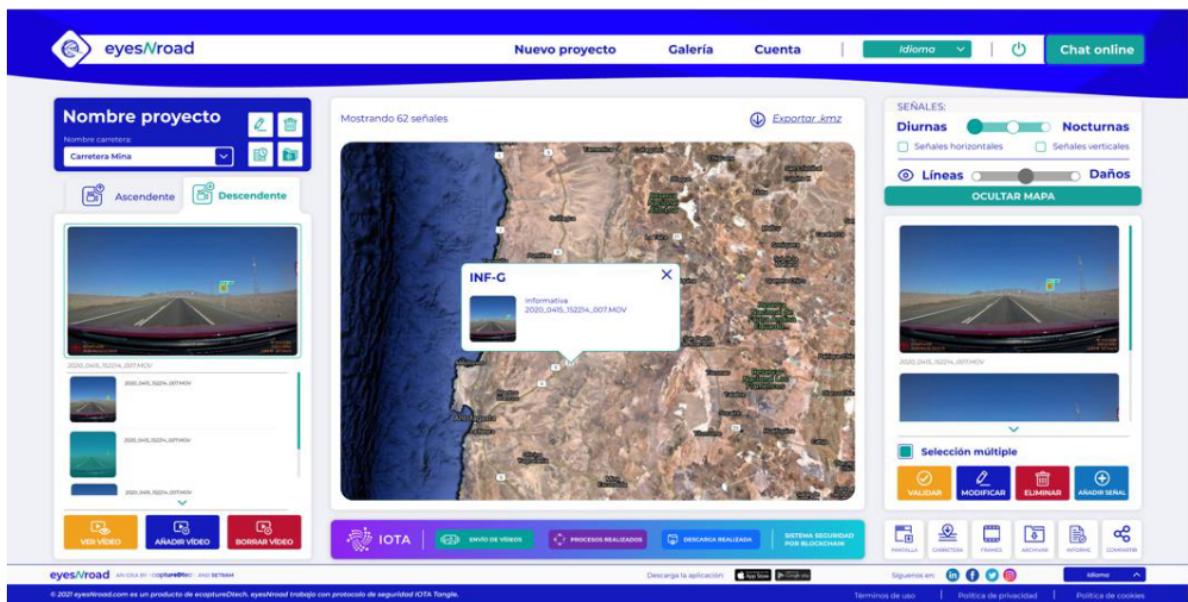


Figura 2.3: Visualización de la señal en un mapa en eyesNroad

Las ventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Facilidad de implementación.* Puede utilizarse con cámaras comunes y es compatible con dispositivos móviles.
- *Amplia detección.* No solo identifica baches, sino también señalización y otros elementos viales.
- *Actualización continua.* La base de datos se amplía constantemente para cubrir más regiones.

Las desventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Limitación geográfica.* Actualmente, su funcionamiento completo está limitado a Portugal.
- *Es de pago.* Para cualquier persona que desee usar esta herramienta tiene que asumir los costes.
- *No calcula volumen.* La plataforma no ofrece estimaciones del volumen de los baches, lo que podría ser útil para reparaciones.

³⁰<https://www.acex.eu/candidatura-3-4/>

El proyecto OMICRÓN

En este proyecto se ha creado un sistema robótico que busca automatizar y robotizar el proceso de sellado de grietas en pavimentos, con el objetivo de eliminar la exposición de los operarios a condiciones peligrosas. El sistema integra un brazo robótico y herramientas de inteligencia artificial para detectar grietas y realizar el sellado de manera autónoma, mejorando así la seguridad y eficiencia en las operaciones de mantenimiento. Esta aplicación ha sido desarrollada para participar en los XX premios de conservación de carreteras de ACEX (año 2024)³¹, que ha resultado ganadora en la en la categoría asociados. Puedes ver su aspecto en la Figura 2.4.



Figura 2.4: Plataforma robótica diseñada para el sellado de grietas

Las ventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Seguridad laboral.* Elimina la necesidad de que los operarios sufran accidentes de tráfico y tengan contacto con materiales peligrosos.
- *Reducción de tiempo.* Debido a la automatización del proceso, se puede reducir el tiempo de intervención.

³¹<https://www.acex.eu/candidatura-12-5/>

- *Innovación en materiales.* Al invertir en crear un mástico nuevo, se puede operar a temperaturas más bajas.

Las desventajas de este proyecto son las siguientes:

- *Es un prototipo.* Todavía está en fase temprana de implementación lo que le impide a los clientes tener una disponibilidad inmediata.
- *Alto coste.* Necesita componentes caros para poder llevar a cabo sus objetivos, como un camión o un brazo robótico, entre otros.
- *Complejidad técnica.* Ya que se trata de una automatización completa, necesita un alto nivel de precisión y coordinación, lo que supone un gran desafío para su implementación.

Sistemas de reconstrucción 3D usando SFM y aprendizaje profundo

Este sistema, descrito en [Wang et al., 2023], propone una solución innovadora para la reconstrucción y segmentación 3D de baches en pavimentos. El enfoque aborda las limitaciones de los métodos tradicionales basados en imágenes 2D al utilizar técnicas de fotogrametría para generar perfiles 3D detallados de los baches. El sistema se compone de un método de reconstrucción conocido como Estructura Desde el Movimiento de Pavimentos (PP-SFM) y una red de segmentación 3D, Trans-3D-Seg, que incorpora módulos de transformadores para mejorar la precisión de la segmentación de nubes de puntos 3D. El sistema muestra una alta precisión, con una puntuación F1 del 92.58 % y una precisión general del 93.44 %. Además, se ha demostrado su robustez en diferentes condiciones, como distintas alturas de adquisición y en luz oscura. Otro sistema muy parecido que cumple con todo lo anterior expuesto y que además incorpora un láser para conseguir una segmentación más robusta, está definido en [Ahmed et al., 2022].

Las ventajas de estos proyectos son las siguientes:

- *Alta precisión.* Los sistemas proporcionan una segmentación precisa de baches, evidenciada por las altas puntuaciones en la precisión y la puntuación F1.
- *Robustez.* Los métodos son robustos en diversas condiciones, incluyendo iluminación variable y diferentes alturas de adquisición, lo cual es crucial para aplicaciones prácticas en el terreno.
- *Facilidad para la integración.* Ya que los sistemas están preparados para operar en cualquier cámara, facilitan la integración.

Las desventajas de estos proyectos son las siguientes:

- *Alto coste computacional.* Debido a la complejidad de las aplicaciones, necesitan un procesamiento intensivo.
- *Hardware potente.* La implementación del sistema necesita *hardware* potente y recursos computacionales considerables para el procesamiento de imágenes y la ejecución de modelos de aprendizaje profundo.
- *Movimiento circular para detección del volumen.* Una vez detectado el bache, es necesario moverse alrededor de él para que el algoritmo de fotogrametría sea capaz de encontrar su volumen, lo que ralentiza el cálculo.

En relación a la detección de los baches se pueden encontrar métodos que se pueden enmarcar en tres distintas categorías, descritas en [Kim et al., 2022], y que se dividen en: baches detectados por visión, baches detectados por vibración y baches detectados por reconstrucción 3D. Cada categoría tiene una serie de ventajas y desventajas, que es importante conocer a la hora de elegir el tipo de método a usar, y que aparecen descritas en el Cuadro 2.1. A continuación se enumeran alguno de los métodos de cada categoría.

Métodos	Ventajas	Desventajas
Visión	Más rentable que reconstrucción 3D Adecuada para ciertos baches	Limitaciones en profundidad Efecta condiciones metereológicas
Vibración	Más rentable de todos Requiere poco almacenamiento Soporta tiempo real	Limitaciones en formas Depende de la arquitectura
Reconstrucción 3D	Forma del bache más precisa	Más caro de todos

Cuadro 2.1: Ventajas y desventajas de los métodos de detección de baches

En visión se puede encontrar el método de [Park et al., 2021], que usa modelos de YOLOv4, YOLOv4-tiny y YOLOv5, un dataset total de 665 imágenes (70 % entrenamiento, 10 % validación, 20 % pruebas) y aplicado sobre Tesla K80 GPU (12 GB) en *Google Colab*. Otro método es el de [Wanli Ye and Xiao, 2021], que utiliza un modelo de *prepooling CNN* con un dataset de 96,000 imágenes (72,000 entrenamiento, 24,000 pruebas), una precisión optimizada hasta de 0.9825. Todo ello probado sobre un Intel Core i7, 32 GB RAM, GeForce GTX 1080 (8 GB).

En vibración se puede encontrar el método de [Du et al., 2020], que usa un filtro *Butterworth*, un modelo gaussiano mejorado y un algoritmo de *k-nearest neighbor*. Se

usan unas 118 muestras de bultos, 174 muestras de planos y 103 de bache. Tiene una precisión de 0.96 para baches y 0.94 para bultos. Se usa un Cavalier con un smartphone Redmi Note 8 Pro con frecuencia de muestreo de 400 Hz. Otro método es el de [Allouch et al., 2017] que usa un filtro paso bajo, con transformada de Fourier. Para clasificar se usa un árbol de decisión C4.5 (0.9860), SVM (0.9525) y Naïve Bayes (0.9690). Todo ello se ha probado sobre un smartphone Galaxy Alpha con frecuencia de muestreo de 50 Hz.

Finalmente, para la reconstrucción 3D se puede encontrar el método de [Dhiman and Klette, 2020], que usa visión estéreo de un solo marco, fusión de múltiples marcos, aprendizaje por transferencia con Mask R-CNN y aprendizaje por transferencia con YOLOv2, todo ello usando una GeForce GTX 1080 y un Tesla K80. Otro método es el de [Ul Haq et al., 2019], que usa un filtro de paso-alto, una ecualización de histograma, una combinación de *waypoints* con triangulación estéreo. Este método ha sido probado en dos webcams A4Tech PKS-732 montadas en un trípode o en la parte trasera de un coche usando un ordenador con sistema operativo Windows.

Los prototipos, métodos y desarrollos tecnológicos presentados demuestran el potencial de la robótica y la IA en el mantenimiento y detección de deterioros en el pavimento. Desde la creación de modelos 3D de baches hasta la automatización del sellado de grietas, estos avances no solo mejoran la seguridad y eficiencia de las operaciones, sino que también optimizan la gestión y planificación del mantenimiento vial. No obstante, cada solución presenta desafíos específicos, como la dependencia de condiciones climáticas, la limitación geográfica y los costes asociados, que deben ser considerados al evaluar su implementación en diferentes contextos.

En el siguiente capítulo se va a proceder a definir una serie de requisitos, metodología y un plan de trabajo que se ha seguido para dar solución a los objetivos que se plantean en este proyecto.

Capítulo 3

Objetivos

Establecer metas es el primer paso para convertir lo invisible en visible.

Tony Robbins

Tras haber establecido el marco contextual del presente proyecto, se procede a presentar la descripción del problema, los requisitos, las competencias tanto adquiridas como empleadas, la metodología y el plan de trabajo seguido.

3.1. Descripción del problema

La idea de este trabajo fin de grado nace tras los acontecimientos vividos por la *Depresión Aislada en Niveles Altos* (DANA) que afectó a la zona de Toledo y Madrid el pasado septiembre de 2023. Estos hechos dejaron inundaciones, pueblos anegados, carreteras cortadas, muchos vecinos perdieron sus casas, y desgraciadamente se cobró la vida de tres personas.

Tras lo sucedido, las carreteras fueron las infraestructuras que más tardaron en arreglarse. La principal causa de que eso ocurriese es la falta de fondos, lo que conlleva un escaso mantenimiento. Además, los operarios que conforman la mano de obra llevan tiempo exigiendo mejoras de seguridad en su entorno laboral, como defiende la Plataforma de Trabajadores de Conservación de Carreteras³².

La solución propuesta en este trabajo busca ayudar a mejorar esta situación, proporcionando un robot de bajo coste y accesible para cualquier persona y que sirva para poder mejorar el mantenimiento de las carreteras y reducir el riesgo de exposición de los operarios. Por lo tanto, este proyecto pretende, como objetivo principal, crear un robot que, usando materiales de bajo coste, sea capaz de navegar por las carreteras, detectar los baches que vaya encontrando y calcular el área necesario de material

³²https://conservacion.es/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=101

que necesitará el bache para ser tapado. De igual manera, todo quedará registrado en una interfaz web en la que cada bache quedará marcado sobre un mapa con su correspondiente descripción para que los operarios puedan operar cuando estimen oportuno.

Con el fin de alcanzar este objetivo principal, se han establecido los siguientes subobjetivos:

1. Investigar los robots o soluciones actuales que cumplan con las características y objetivos establecidos.
2. Seleccionar los componentes hardware de bajo coste necesarios para construir el esqueleto del robot.
3. Analizar las diferentes opciones de diseño que más encajen con la forma del robot.
4. Diseñar las piezas en CAD usando herramientas de *software* libre.
5. Usar material típico de impresión 3D para imprimir las partes del robot, como puede ser ABS o PLA.
6. Desarrollar un modelo del robot para que pueda ser usado en simulación usando herramientas robóticas.
7. Desarrollar software necesario usando herramientas robóticas para poder controlar el robot físico.
8. Realizar algunos experimentos en entorno reales o adaptados.

3.2. Requisitos

Tras nombrar los objetivos y subobjetivos a cumplir en este proyecto, se enumeran los requisitos que se han de satisfacer:

1. El coste total de la fabricación del robot no debe superar los 250€.
2. Todas las piezas diseñadas deben poderse imprimir en cualquiera impresora convencional.
3. Se usará Ubuntu con soporte a largo plazo como sistema operativo, tanto para el ordenador como para el robot.

4. A fin de facilitar la implementación de este proyecto para cualquier tipo de usuario, no será necesario disponer de ninguna tarjeta gráfica de uso dedicado para entrenar los modelos.
5. Los modelos entrenados se deben ajustar a las limitaciones hardware del robot.
6. Se busca que sea un proyecto a largo plazo, por eso se debe realizar la integración con la plataforma ROS2.

3.3. Competencias

A continuación se detallan las competencias que se han empleado y adquirido para la realización del presente trabajo fin de grado.

3.3.1. Competencias empleadas

Las competencias empleadas para la realización de este proyecto, y que han sido tomadas de las distintas asignaturas del grado, son las siguientes:

1. Evolución y futuro de la robótica: *CE1*. Capacidad para analizar la evolución de la Ingeniería Robótica y ser capaz de identificar sus aplicaciones, oportunidades de emprendimiento y su impacto en el futuro. Esta competencia ha sido empleada para poder desarrollar los capítulos 1 y 2 de este proyecto.
2. Laboratorio de sistemas: *CE9*. Capacidad de conocer y manejar los sistemas y las herramientas de las que dispone para su gestión y programación. Esta competencia ha sido empleada para poder configurar y ejecutar código del robot en entornos no gráficos.
3. Sensores y actuadores: *CE12*. Capacidad de diseñar robots y sistemas inteligentes atendiendo a los elementos de sensorización y actuación más adecuados dependiendo de la aplicación, los requerimientos del sistema y las condiciones del entorno. Esta competencia ha sido empleada para poder encontrar los componentes hardware necesarios para poder llevar a cabo el esqueleto del robot.
4. Arquitectura *software* para robots: *CE15*. Capacidad de diseñar y programar aplicaciones robóticas y sistemas inteligentes en red usando *middlewares*, mecanismos de comunicación y estándares propios del ámbito de la Ingeniería Robótica. Esta competencia ha sido empleada en el momento de decidir el tipo de arquitectura *software* necesaria a implementar en el robot.

5. Visión artificial: *CE25*. Capacidad de conocer y aplicar métodos de extracción de información a partir de la información percibida por cámaras y sensores 3D al desarrollo de aplicaciones en robots y sistemas inteligentes. Esta competencia ha sido empleada para poder extraer información de la cámara y ser capaz de tratarla.
6. Mecatrónica: *CE32*. Capacidad de diseñar y construir robots móviles. Esta competencia ha sido empleada en el diseño e impresión en 3D de mi robot.
7. Aprendizaje automático: *CE27*. Capacidad de construir sistemas capaces de resolver problemas a partir de información no estructurada proporcionada por ejemplos o por la experiencia. Esta competencia ha sido empleada para poder ser capaz de crear modelos de aprendizaje automático y aplicarlos al robot.

3.3.2. Competencias adquiridas

Las competencias adquiridas con el desarrollo de este trabajo fin de grado, y que aparecen descritas en la guía docente de la propia asignatura, son las siguientes:

1. *CB2*. Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio. Esta competencia se adquiere gracias a la aplicación de las competencias empleadas justificadas anteriormente y que se pueden ver plasmadas en todo el proyecto.
2. *CB4*. Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado. Esta competencia se adquiere al describir de forma precisa y comprensible todo el proceso complejo implicado en este proyecto dentro del presente documento.
3. *CB5*. Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía. Esta competencia se logra al adquirir el conocimiento suficiente para desarrollar este trabajo de forma totalmente autónoma, contrastando información con distintas fuentes, haciendo pruebas con distintos tipos de *software*, entre otras.
4. *CE28*. Desarrollo de las capacidades adecuadas para realizar un ejercicio original individual (o excepcionalmente colectivo), presentarlo y defenderlo ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías

específicas del campo de la Robótica de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas. Esta última competencia se cumple con el desarrollo de este proyecto: que abarca desde la elección del tema, el conocer el estado del arte, la implementación tanto *hardware* como *software*, el desarrollo de la presente memoria hasta su defensa ante un tribunal.

3.4. Metodología

Para llevar a cabo este proyecto se ha optado por seguir una metodología que se iniciaba con una profunda investigación sobre el estado del arte para comprobar la viabilidad del desarrollo del presente proyecto. Posteriormente, tras haber elegido el *hardware* necesario para el robot, se decidió usar una metodología experimental que ayudó a decidir el diseño final que tendría el robot. Una vez cumplido esto, se imprimieron y ensamblaron las distintas piezas.

Para dar soporte *software* al robot real se probó y configuró cada sensor y actuador del robot en distintos sistemas operativos y versiones hasta encontrar la combinación que mejor cumpliese todos los objetivos. Una vez conseguido eso, se decidió seguir un ciclo de desarrollo conocido como *Plan Do Check Act* (PDCA) y así poder ir haciendo pequeños avances consistentes hasta llegar a una versión completamente funcional. Para el desarrollo del robot simulado también se decidió usar la metodología PDCA. Esta metodología sigue los siguientes pasos cíclicos descritos en la imagen 3.1.

3.5. Plan de trabajo

El desarrollo del presente trabajo fin de grado se ha dividido en las siguientes etapas:

1. *Investigación del estado del arte.* En esta fase inicial, se realizaron búsquedas en plataformas online como Google Scholar y otras relacionadas con el mantenimiento de carreteras con el fin de encontrar soluciones al problema descrito.
2. *Planteamiento hardware del robot.* Una vez conocida la viabilidad del proyecto, se decidió estudiar qué componentes *low-cost* eran necesarios para dar forma al esqueleto del robot.
3. *Diseño de prototipos del robot.* Tras conocer cuál será el esqueleto del robot, usando cartón y pegamento se hicieron una serie de prototipos hasta encontrar la



Figura 3.1: Método PDCA

solución final. Posteriormente se usó la herramienta FreeCAD para modelar las distintas piezas.

4. *Impresión 3D y ensamblaje de las piezas.* Una vez el diseño estaba hecho, se decidió imprimirlo usando filamento de tipo PLA azul. Finalmente, se produjo el ensamblaje de todas las piezas.
5. *Desarrollo del robot en simulación.* Tras tener el robot completamente montado, se decidió desarrollar el modelo del robot pero esta vez para que se pudiera trabajar con él en simulación; en este caso, usando Gazebo.
6. *Configuración hardware del robot.* Tras tener al robot listo en simulación, se decidió configurar cada componente hardware del robot en distintos sistemas operativos hasta encontrar el que mejor encajase con la arquitectura del mismo.
7. *Desarrollo software del robot en físico.* Una vez el robot está completamente configurado y listo para operar en un entorno real, se desarrollaron una serie de nodos en ROS2. Estos ayudan a ?? el correcto funcionamiento de cada

componente hardware siguiendo el propósito buscado.

8. *Experimentos en un entorno real.* En esta etapa final, se realizaron distintos experimentos en el entorno real para demostrar que se cumplía el objetivo principal.

Asimismo, a lo largo de todo el proceso se ha ido elaborando la presente memoria. La dinámica seguida con el tutor ha sido de reuniones semanales o cada dos semanas, dependiendo de la disponibilidad por las dos partes. En dichas reuniones se comentaban todos los avances realizados y se proponían aspectos a mejorar, sugerencias, y se definían nuevos objetivos a conseguir.

Todo el contenido del proyecto está alojado en un repositorio público de GitHub³³. Además, todo el trabajo diario está documentado en el apartado Wiki³⁴ de dicho repositorio; dividido en *diario* y en *evolución del proyecto*. El apartado de *diario* trata de contar de forma coloquial qué se ha ido realizando cada día o cada pocos días. Por otro lado, en *evolución del proyecto* se puede encontrar la explicación detallada de ciertos códigos, así como de conceptos teóricos, entre otros detalles.

Tras conocer todos los objetivos, subobjetivos, requisitos, competencias, metodología y plan de trabajo llevado a cabo para la realización de este proyecto, se procede a tratar las plataformas de desarrollo usadas.

³³<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez>

³⁴<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/wiki>

Capítulo 4

Plataforma de desarrollo

*Las herramientas adecuadas en las manos adecuadas
pueden cambiar el mundo*

Steve Jobs

Tras haber establecido los objetivos que se pretenden alcanzar en este proyecto, en este capítulo se van a tratar las distintas plataformas de desarrollo, tanto *hardware* como *software*, que han contribuido en la consecución de dichos objetivos.

4.1. Hardware

En este apartado se van a describir el conjunto de componentes hardware que se han adquirido para llevar a cabo este proyecto, siempre primando el menor coste de cada componente.

4.1.1. Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi es una computadora de bajo coste y con un tamaño compacto que es ideal para proyectos de electrónica, programación y educación. Esta, en su cuarta versión, dispone de un procesador ARM Cortex-A72 de cuatro núcleos a 1,50GHz fabricado en 28nm y con tres configuraciones de memoria. Además, entre otras características, ahora solo necesita una alimentación de USB-C, tiene dos conectores micro HDMI, conexión Wifi, Bluetooth 5.0, dos USB 2.0 y dos USB 3.0. Esta versión de Raspberry permite la compatibilidad con la mayoría de accesorios gracias al conector GPIO de cuarenta pines y el conector *Camera Serial Interface* (CSI). Gracias a esos cuarenta pines, el usuario puede interactuar con una amplia variedad de dispositivos externos, como sensores, LEDs y motores, lo que lo hace excelente para proyectos de automatización y robótica.

Sin embargo, la Raspberry Pi usa procesadores ARM, que, aunque eficientes energéticamente, no están optimizados para realizar tareas intensivas de IA como entrenar modelos de redes neuronales o ejecutar inferencias en tiempo real a gran escala. En la figura 4.1 se puede ver una imagen de la placa con referencia a las distintas partes de la misma. Esta placa tiene un coste de unos 65€.

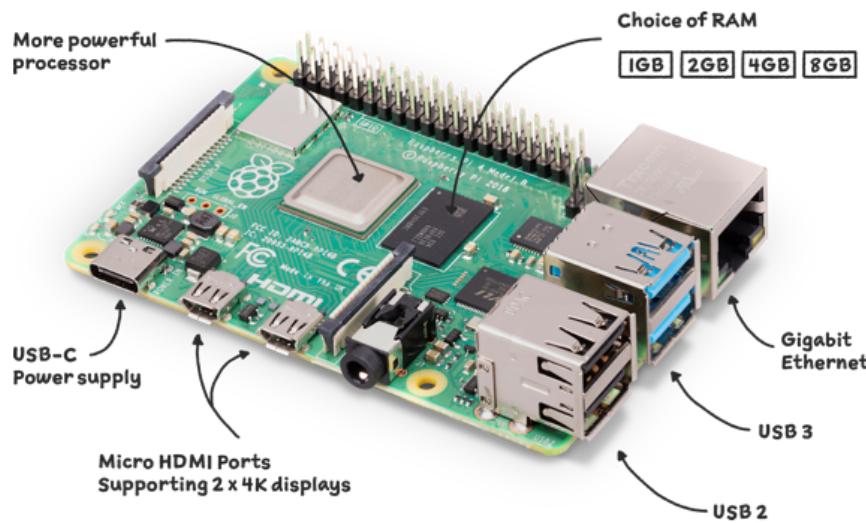


Figura 4.1: Raspberry Pi 4³⁵

4.1.2. Raspberry Pi cámara

Esta cámara (Figura 4.2) tiene un tamaño de 23.86 x 25 x 9mm, utiliza el sensor de imagen IMX219PQ de Sony que ofrece imágenes de vídeo de alta velocidad y alta sensibilidad. Dispone también de funciones de control automático, como el control de exposición, el balance de blancos y la detección de luminancia. Esta cámara usa un cable plano que se conecta directamente al puerto CSI. Su coste aproximado es de 18€.

4.1.3. GPS NEO 6M

Para poder identificar dónde se encuentra cada bache es necesario hacer uso de un posicionamiento global mediante satélites. En este caso se decidió usar el módulo NEO 6M (Figura 4.3), cuyo precio aproximado es de 9€. Este módulo utiliza el chipset u-blox

³⁵<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

³⁶<https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>



Figura 4.2: Raspberry Pi Cámara V2³⁶

NEO-6M, que proporciona un seguimiento preciso de la posición utilizando satélites GPS, permitiendo determinar la latitud, longitud, altitud, y velocidad. Además, incluye una antena cerámica externa de alta ganancia (puede ser interna en algunas versiones) que mejora la recepción de la señal GPS, incluso en áreas con una señal débil.

Tiene una precisión de aproximadamente 2.5 metros en condiciones abiertas. Soporta hasta veintidós satélites simultáneamente, lo que le permite ofrecer posicionamiento confiable y estable. Asimismo, utiliza comunicación por *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART) comúnmente a 9600 bps, lo que facilita su integración con muchas placas del mercado.



Figura 4.3: Módulo GPS NEO 6M³⁷

4.1.4. Sevomotor Estándar Parallax

Este tipo de servo tiene un rango de rotación de 0 a 180 grados y es compatible su control usando *Pulse Width Modulation* (PWM) con un pulso alto de 0.75–2.25 ms en intervalos de 20 ms (Figura 4.4 izquierda). Estos tipos de servos son muy comunes en aplicaciones de animatrónica y robótica. Su precio ronda los 17€.

³⁷<https://www.amazon.es/dp/B088LR3488?ref>



Figura 4.4: Servomotor Parallax³⁸

4.1.5. Ruedas ActivityBot

Para implementar las ruedas de este robot se decidió tomar las ruedas del kit robótico ActivityBot, que usa este tipo de ruedas. Se trata de una rueda de plástico con neumático tipo junta tórica (Figura 4.5). El perfil estrecho convierte a esta rueda en ideal para aplicaciones que requieren una dirección precisa y el diámetro de la rueda es de 66mm. Se pueden adquirir individualmente con un coste de 4,54€ la unidad.



Figura 4.5: Rueda ActivityBot³⁹

4.1.6. Google Coral USB

El Google Coral USB Accelerator (Figura 4.6) es un dispositivo que permite acelerar tareas de IA en dispositivos que no cuentan con hardware especializado para ello.

³⁸<https://www.parallax.com/product/parallax-standard-servo/>

³⁹https://es.rs-online.com/web/p/accesorios-para-kits-de-desarrollo/8430897?srsltid=AfmB0rv3a6_tQNdqAoKx_21Mn1m2MAum68oApyvr5mq8ExPTuh_CVNy

Está diseñado para ejecutarse con modelos de aprendizaje automático utilizando la unidad de procesamiento de tensores de Google, lo que mejora significativamente la velocidad de inferencia en aplicaciones de IA. Está optimizado para ejecutar modelos preentrenados en TensorFlow Lite, la versión ligera de TensorFlow diseñado para dispositivos con recursos limitados. Sólo es compatible con las versiones desde Python 3.6 hasta la versión 3.9.

Gracias a todas esas características y para mejorar la detección de baches en tiempo real y solventar las limitaciones de la Raspberry Pi, se ha decidido incluir este componente en el proyecto. Su precio es de unos 65€.



Figura 4.6: Google Coral USB⁴⁰

4.1.7. Power bank

Para poder alimentar a todos los componentes se ha incluido en el prototipo robótico una *power bank* de bastante capacidad para que permita la autonomía del robot durante un tiempo más que razonable. Para ello se ha elegido la Xiaomi Redmi Power Bank de 20000 mAh, cuyas dimensiones son: 73,6 x 27,3 x 154 mm. Su precio ronda los 30€.



Figura 4.7: Xiaomi Powerbank⁴¹

⁴⁰<https://coral.ai/products/accelerator/>

4.1.8. Rueda loca

Para poder conseguir un movimiento correcto y poder encontrar el punto de apoyo para el robot, es necesario incluir al robot una rueda loca. Tras investigar para encontrar la que mejor encaja, se ha decidido incluir una rueda loca como la que aparece en la Figura 4.8 que tiene las siguientes dimensiones: 5,3 x 2,9 x 2 cm. El precio de una de ellas es de 1,13€.



Figura 4.8: Rueda loca⁴²

4.1.9. Ordenador principal

Para poder desarrollar programas, hacer pruebas en simulación, permitir conectarse por SSH a la Raspberry Pi y poder comandar acciones al robot, ha sido necesario tener un ordenador principal que permita realizar todas las tareas. El ordenador que aparece en la Figura 4.9 es el que se ha empleado en este proyecto y cumple las características descritas en el Cuadro 4.1.

⁴¹<https://buy.mi.com/es/item/3202200053>

⁴²https://www.amazon.es/dp/B0BZZCJJT8?ref=cm_sw_r_mwn_dp_N64JV6SGENWN4YPSD849&ref_=cm_sw_r_mwn_dp_N64JV6SGENWN4YPSD849&social_share=cm_sw_r_mwn_dp_N64JV6SGENWN4YPSD849&language=es-ES

⁴³<https://www.asus.com/es/laptops/for-home/vivobook/vivobook-14-k413/>

Figura 4.9: ASUS VivoBook 14⁴³

Características	Descripción
Pantalla	14 pulgadas, Full HD (1920x1080), tecnología LED, antirreflejo
Procesador (CPU)	Intel Core i7 de 10 ^a generación
Memoria RAM	8GB
Almacenamiento	512GB
Tarjeta gráfica (GPU)	Intel UHD Graphics de la serie Comet Lake-U GT2
Sistema Operativo	Windows 10 y Ubuntu 22.04
Puertos 1	1x USB 3.2 Gen 1 Tipo-A, 1x USB 3.2 Gen 1 Tipo-C, 2x USB 2.0
Puertos 2	1x HDMI, lector de tarjetas microSD, entrada combo de audio
Conectividad	Wi-Fi 5 (802.11ac), Bluetooth 4.1 / 5.0
Batería	37 Whr
Peso	1.4 kg
Dimensiones	32.5 x 21.6 x 1.99 cm

Cuadro 4.1: Especificaciones técnicas del ordenador usado

4.2. Software

En este apartado se van a describir el conjunto de programas y librerías que han sido necesarios usar cumplir con los objetivos del Capítulo 3.

4.2.1. FreeCAD

Esta herramienta de código abierto (Figura 4.10) es un *software* de diseño asistido por computadora utilizado principalmente para la creación de modelos 3D en diferentes áreas como la ingeniería, arquitectura, y diseño de productos. Está diseñado para ser altamente modular formado por *workbenches*, lo que permite a los usuarios adaptar y extender su funcionalidad según sus necesidades.

FreeCAD se basa en el concepto de modelado paramétrico, lo que permite modificar el diseño fácilmente. Los usuarios pueden retroceder en la historia de un modelo y cambiar parámetros que actualizan automáticamente el diseño. También FreeCAD es

multiplataforma, cuenta con una consola de Python integrada y soporta una amplia gama de formatos de archivo como STL y SVG entre otros. Esta ha sido la herramienta elegida para hacer el diseño 3D de la pieza y la generación del formato STL para su posterior impresión.



Figura 4.10: Logo de Freecad ⁴⁴

4.2.2. Python

Python (Figura 4.11) es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, ampliamente reconocido por su simplicidad y legibilidad. Fue creado por Guido van Rossum y lanzado por primera vez en 1991, y ha crecido rápidamente en popularidad debido a su versatilidad y facilidad de uso tanto para principiantes como para programadores experimentados lo que le convierte en un lenguaje multiplataforma y multiparadigma.

Python es un lenguaje interpretado, lo que significa que el código se ejecuta línea por línea sin necesidad de ser compilado. Esto facilita el desarrollo rápido y la depuración. Tiene una sintaxis sencilla, legible y es ampliamente utilizado en áreas como: desarrollo web (Django y Flask), ciencia de datos y aprendizaje automático (NumPy, Pandas, TensorFlow, y PyTorch), automatización y scripting, entre otros.

Debido a esa simplicidad y versatilidad en Raspberry Pi, se considera Python como uno de los lenguajes de programación oficiales recomendados y es por ello que se ha decidido usar este lenguaje para este proyecto.

Software matemático

NumPy (Numerical Python) es una biblioteca fundamental para el cálculo numérico en Python. Está diseñada para facilitar el manejo eficiente de vectores, grandes matrices

⁴⁴<https://www.freecad.org/>

⁴⁵<https://es.python.org/>



Figura 4.11: Logo de Python ⁴⁵

y arrays multidimensionales, junto con una amplia colección de funciones matemáticas para realizar operaciones sobre estos arrays. Es tal su poder que se ha decidido usar en este proyecto para poder calcular el área del bache.

Software localización

PyNMEA2 es una biblioteca de Python que se utiliza para analizar y generar mensajes en formato NMEA (National Marine Electronics Association), un estándar utilizado en dispositivos GPS y otros sistemas de navegación marina. Es especialmente útil cuando trabajas con módulos GPS en proyectos de Raspberry Pi u otros dispositivos embebidos, ya que te permite interpretar la información que estos dispositivos envían, como la localización, velocidad y tiempo.

PyNMEA2 te permite interpretar las sentencias NMEA, que son los datos en bruto que los módulos GPS envían, usualmente en forma de texto. Algunas sentencias comunes son:

\$GPGGA: proporciona datos como la latitud, longitud, y altitud.

\$GPRMC: contiene información esencial de ubicación, velocidad y tiempo.

\$GPGLL: latitud y longitud.

En este proyecto, se van a emplear las sentencias de \$GPGGA para estimar la ubicación de cada bache.

4.2.3. OpenCV

OpenCV (Figura 4.12) es una biblioteca de software de código abierto diseñada para la visión artificial y el procesamiento de imágenes. Fue desarrollada inicialmente por Intel en 1999 y ahora es mantenida por una gran comunidad de desarrolladores. OpenCV es ampliamente utilizada en aplicaciones que requieren análisis de imágenes, detección de objetos, reconocimiento de rostros, visión computacional, y mucho más. Gracias a su gran aplicación se ha decidido integrar en el TFG para la detección del

bache y el cálculo del área.



Figura 4.12: Logo de OpenCV ⁴⁶

4.2.4. Ubuntu

Ubuntu (Figura 4.13) es una distribución GNU/Linux basada en Debian GNU/Linux, que incluye principalmente software libre y de código abierto y es mantenida por Canonical Ltd. Puede utilizarse en ordenadores y servidores. Está orientado al usuario promedio, con un fuerte enfoque en la facilidad de uso y en mejorar la experiencia del usuario. Debido a ser software libre es uno de los sistemas operativos más populares y es conocido por su facilidad de uso, estabilidad, amplia comunidad de soporte y por sus actualizaciones periódicas.



Figura 4.13: Logo de Ubuntu ⁴⁷

Entre todas las versiones existentes para la realización del proyecto se ha usado Ubuntu 22.04 y Ubuntu 20.04. El ordenador usado (descrito en el Apartado 4.1.9) tiene instalado Ubuntu 22.04 *Long Time Support* (LTS) pero el robot inicialmente usaba Ubuntu 22.04 y finalmente está usando Ubuntu 20.04 LTS Server, una versión de Ubuntu sin interfaz gráfica. La decisión de usar Ubuntu 20.04 es debido a que el dispositivo Google Coral USB descrito en el Apartado 4.1.6 es compatible con

⁴⁶<https://opencv.org/>

⁴⁷<https://ubuntu.com/>

versiones de Python entre 3.6 y 3.9 siendo en Ubuntu 22.04 la instalación de Python por defecto de 3.10 y el intento de cambiar dicha versión generó numerosos problemas de dependencias sobre todo con la versión de ROS2 usada. En muchos foros tampoco aconsejaban modificar las versiones de Python que vienen instaladas por defecto⁴⁸ y que la Rasberry únicamente tuviese esta aplicación se recomienda migrar a Ubuntu 20.04⁴⁹ que usa Python 3.8. A continuación, se va a mostrar un Cuadro 4.2 con algunas de las diferencias entre Ubuntu 22.04 y Ubuntu 20.04.

Características	Ubuntu 20.04	Ubuntu 22.04
Fecha de lanzamiento	Abril 2020	Abril 2022
Soporte	Hasta Abril 2025	Hasta Abril 2027
Kernel	Linux 5.4	Linux 5.15
Entorno de escritorio	GNOME 3.36	GNOME 42
Python	Python 3.8	Python 3.10
Soporte gráfico NVIDIA	Soporte estándar	Soporte mejorado con Wayland

Cuadro 4.2: Diferencias entre Ubuntu 20.04 y Ubuntu 22.04

4.2.5. ROS 2

Por sus siglas en inglés, *Robot Operating System* (ROS) se trata de un *middleware* para programar robots. Un *middleware* es una capa de software entre el sistema operativo y las aplicaciones de usuario que permiten llevar a cabo aplicaciones *software* independiente del dominio que ese encuentre. Es decir, ROS aporta un conjunto de herramientas, bibliotecas y convenciones. También, ofrecen desarrollo, integración, ejecución y herramienta de monitorización. El número 2 indica que es la segunda generación de este middleware.

ROS 2 tiene tres diferentes dimensiones: la comunidad de ROS 2 que contribuye al desarrollo de aplicaciones es enorme, el grafo de computación de una aplicación en ROS 2 está formado por nodos conectados con distintos paradigmas de comunicación y el espacio de trabajo, también conocido como *workspace*, es aquel que se trata del *software* instalado que se divide a su vez en *underlay* (la instalación básica de ROS 2) y *overlay* (son el resto de programas que se desarrollan).

Según se ha explicado en el Apartado 4.2.4, debido a que he necesitado para este proyecto usar Ubuntu 20.04 y Ubuntu 22.04; he tenido que usar las dos distribuciones más estable de ROS para cada versión de Ubuntu: ROS 2 Foxy y ROS 2 Humble respectivamente (Figura 4.14).

⁴⁸<https://github.com/google-coral/pycoral/issues/81>

⁴⁹<https://robotics.stackexchange.com/questions/104413/>

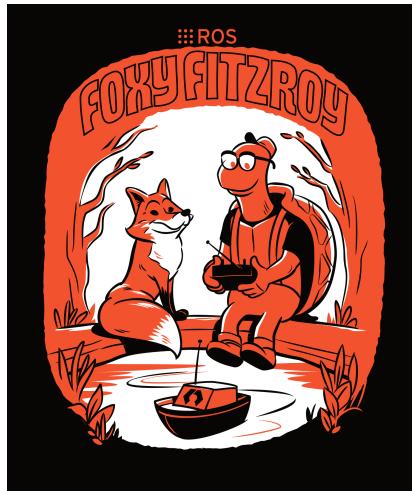
Ros2 Foxy⁵⁰Logo Ros2 Humble⁵¹

Figura 4.14: Distribuciones de ROS 2 usadas

ROS 2 Control

ROS 2 Control⁵² es un framework dentro de ROS 2 diseñado para facilitar el control de robots en tiempo real. Proporciona una infraestructura modular y escalable para manejar controladores que gestionan los actuadores (motores, servomotores, etc.) de un robot, así como la lectura de sensores. Se utiliza comúnmente en robots móviles, brazos robóticos, drones y otras plataformas robóticas.

Los componentes principales de ROS 2 Control son:

- *Controller Manager*. Gestiona controladores e interfaces de hardware en el framework ROS 2 Control.
- *Resource Manager*. Abstacta y gestiona el hardware, permitiendo la reutilización flexible de componentes.
- *Controllers*. Utilizan la teoría de control para interactuar con el hardware.
- *User interface*. Pueden interactuar con el sistema mediante servicios y una interfaz de línea de comandos.
- *Hardware Components*. Realizan comunicación con hardware físico como puede ser: sistemas, sensores y actuadores.

En este proyecto se ha decidido usar ROS 2 Control para crear un modelo del robot en simulación y poder trabajar con él usando la filosofía de ROS 2 Control.

⁵⁰<https://docs.ros.org/en/foxy/Installation.html>

⁵¹<https://docs.ros.org/en/humble/index.html>

⁵²https://control.ros.org/rolling/doc/getting_started/getting_started.html

4.2.6. Gazebo

Gazebo (Figura 4.15) es un simulador de robots que permite modelar entornos físicos tridimensionales y probar robots en ellos sin necesidad de tener el robot en físico y evitar así posibles caídas o golpes. Es ampliamente utilizado en la investigación y desarrollo de robótica, especialmente en combinación con ROS y ROS 2. Además, ofrece una simulación realista en un entorno 3D y por ello se decidió usar este simulador para el proyecto.



Figura 4.15: Logo de Gazebo ⁵³

4.2.7. Herramientas de monitorización

Rviz

RViz (Figura 4.16) es una herramienta de visualización en 3D utilizada en ROS y ROS 2 para representar información del sistema robótico. Permite a los usuarios ver datos en tiempo real como la posición de un robot, sensores, cámaras, mapas y otros elementos. Se ha utilizado para monitorear el comportamiento del robot en simulación.

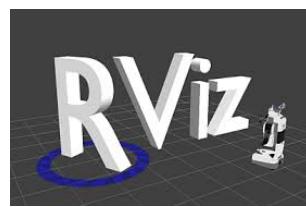


Figura 4.16: Logo de Rviz ⁵⁴

⁵³<https://gazebosim.org/home>

⁵⁴<http://wiki.ros.org/rviz>

RQT Image View

RQt Image View⁵⁵ es una herramienta gráfica dentro del ecosistema de ROS y ROS 2 que permite visualizar imágenes en tiempo real de un flujo de datos de imágenes publicado por una cámara en un sistema robótico. Se ha usado esta herramienta para monitorizar la cámara del robot físico.

Ros2cli

ROS 2 *Command Line Interface* (CLI)⁵⁶ es una herramienta que permite interactuar con el sistema ROS 2 mediante comandos desde la terminal. Ofrece una forma rápida y sencilla de acceder a las funciones y características de ROS 2 sin necesidad de escribir o ejecutar código complejo. Ha sido la herramienta principal en este proyecto para ejecutar los distintos nodos, comprobar si estaban bien lanzados, si se producía buena comunicación entre ellos, entre otras aplicaciones.

4.2.8. Google Colaboratory

Google Colaboratory (Figura 4.17) un servicio en la nube proporcionado por Google que permite escribir y ejecutar código en Python a través de un entorno de Jupyter Notebook. No requiere configuración para su uso y proporciona acceso gratuito a recursos de computación, incluidos GPUs y TPUs. Es especialmente usado para el aprendizaje automático, la ciencia de datos y la educación. Gracias a esta herramienta se puede cumplir del apartado 3.2 de Requisitos, el número 4.



Figura 4.17: Logo de Google Colab⁵⁷

⁵⁵http://wiki.ros.org/rqt_image_view

⁵⁶<https://docs.ros.org/en/humble/Tutorials/Beginner-CLI-Tools.html>

⁵⁷<https://colab.research.google.com/>

4.2.9. YOLOv8

YOLOv8 (Figura 4.18) desarrollado por la empresa Ultralytics, es una versión avanzada del popular modelo de detección de objetos *You Only Look Once* (YOLO), diseñado para identificar y localizar objetos en imágenes y videos en tiempo real. Esta versión es conocida por su eficiencia y precisión en la detección de objetos. Es compatible con TensorFlow y PyTorch. También ofrece optimización para diferentes plataformas incluidos como EdgeTPU para dispositivos con recursos limitados como puede ser Raspberry Pi. Debido a todo lo anterior, esta herramienta ha sido elegida para el entrenamiento del modelo de detección de baches.



Figura 4.18: Logo de YOLOv8 ⁵⁸

4.2.10. TensorFlow Lite

TensorFlow es una plataforma de código abierto desarrollada por Google para el aprendizaje automático y el desarrollo de redes neuronales. Su diseño permite a los desarrolladores e investigadores crear, entrenar y desplegar modelos de aprendizaje automático de manera eficiente en una variedad de dispositivos, desde ordenadores de alto rendimiento hasta dispositivos con recursos limitados como puede ser Raspberry Pi. Para poder ejecutar modelos en dispositivos una Raspberry se usa TensorFlow Lite (Figura 4.19) ya que está preparada para optimizar los modelos. Es por ello que cualquier modelo que se quiera usar se tiene que convertir a este formato.



Figura 4.19: Logo de TensorFlow Lite ⁵⁹

⁵⁸<https://docs.ultralytics.com/es>

4.2.11. Interfaz Web

Para poder hacer más amigable la interacción humano-robot, se ha decidido plasmar los datos obtenidos a través de una interfaz web y para ello se ha decidido usar las siguientes herramientas:

ROS2bridge Server

ROS2bridge Server⁶⁰ es parte de ros2bridge_suite y ofrece una capa de transporte WebSocket para la comunicación bidireccional entre páginas web y ROS 2. Convierte mensajes JSON en llamadas a ROS 2 y viceversa, permitiendo que las páginas web interactúen con ROS 2.

OpenStreetMaps

OpenStreetMaps (Figura 4.20) un proyecto internacional colaborativo desde 2004 que proporciona datos geográficos gratuitos y abiertos, permitiendo la creación de mapas detallados y editables de cualquier parte del mundo por usuarios voluntarios que den crédito a OpenStreetMaps. OpenStreetMaps es utilizado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo navegación, análisis de datos geográficos, y proyectos de código abierto relacionados con mapas y geolocalización.



Figura 4.20: Logo de Open Street Maps⁶¹

Tras conocer todas las plataformas de desarrollo para realizar el presente trabajo fin de grado, es el momento de contar el desarrollo completo llevado a cabo para la construcción hardware del robot que se explicará detalladamente en el siguiente capítulo.

⁵⁹<https://ai.google.dev/edge/litert>

⁶⁰http://wiki.ros.org/rosbridge_server

⁶¹<https://www.openstreetmap.org>

Capítulo 5

Implementación hardware del robot

La perfección se logra no cuando no hay nada más que añadir, sino cuando no hay nada más que quitar

Antoine de Saint-Exupéry

Tras haber expuesto todas las plataformas de desarrollo utilizadas en este proyecto, en este capítulo se describirá el proceso paso a paso, desde la concepción inicial hasta la construcción y ensamblaje, para que sea completamente operativo el robot, incluyendo todos los problemas encontrados así como la solución propuesta.

5.1. Geometría del robot

En este apartado se detalla el proceso llevado a cabo para definir la idea y la forma elegida para el robot.

Mirando robots de campo, todos seguían la estructura de robots con ruedas,....

Intentando pensar en un robot de bajo coste, encontré el paper de Julio vega tutor de este tfg, me proporcionó un Pibot y en base de ese robot, lo adapté a mi objetivo principal descrito en el Capítulo 3. (incluir imagen de pibot)

Seguí mi investigación y tuve que cambiar la cámara que mirase hacia abajo ya que el objetivo principal lo reeuiere

Finalmente para poder cumplir con el objetivo principal es necesario definir el esqueleto del robot, los componentes electromecánicos, todos aquellos que no se pueden imprimir.

A TENER EN CUENTA

En el apartado de geometría del robot, se deben explicar varios aspectos clave relacionados con la configuración física y espacial del robot. Aquí te doy algunos puntos que podrías incluir:

Estructura física del robot: Describir la forma general del robot (por ejemplo, cuadrúpedo, bípedo, con ruedas, etc.). Mencionar las dimensiones principales: altura, longitud, ancho, y peso. Indicar la distribución de los componentes, como la ubicación de los motores, sensores, cámaras, etc.

Disposición de las articulaciones o partes móviles: Explicar la cantidad de grados de libertad (DoF) que tiene el robot y cómo están distribuidos (por ejemplo, en los brazos, piernas, etc.). Detallar cómo se conectan las partes móviles del robot, como los servomotores, ruedas o brazos robóticos.

Centro de gravedad y estabilidad: Describir cómo se distribuye el peso en el robot, con énfasis en el centro de gravedad. Explicar cómo la geometría asegura la estabilidad del robot, especialmente si es un robot móvil o articulado.

Cinemática del robot: Si el robot tiene movimiento, explicar la relación entre las partes móviles y cómo interactúan para lograr desplazamiento o maniobras específicas. En robots con ruedas o patas, describir la disposición y geometría de las ruedas o extremidades para el desplazamiento.

Ángulos de visión y alcance de sensores o cámaras: Describir la disposición geométrica de los sensores y cámaras, cubriendo su campo de visión, ángulo de captura o alcance. Mencionar cómo esta disposición afecta la capacidad del robot para interactuar con su entorno.

Espacio de trabajo: Si el robot es manipulador, incluir una descripción del espacio de trabajo alcanzable por los brazos o herramientas. Explicar los límites geométricos del movimiento y cómo influyen en la capacidad del robot para realizar tareas.

Simetría o asimetría en el diseño: Comentar si el robot tiene una geometría simétrica o asimétrica, y cómo esto impacta su funcionalidad o estabilidad.

Este apartado debe centrarse en cómo la forma y disposición del robot afectan su capacidad para realizar tareas, moverse y mantener el equilibrio en su entorno.

5.2. Elección de componentes hardware

Explicar todos los componentes usados:

5.2.1. Raspberry Pi

Es muy usado en robótica, ordenador a bordo,....

5.2.2. Servomotores Parallax

La fuerza, la utilidad que hacen,...

5.2.3. Ruedas ActivityBot

La fuerza, la utilidad que hacen,...

5.2.4. Rueda/Bola Loca

La fuerza, la utilidad que hacen,...

5.2.5. Raspberry Pi Cámara

Calidad de la imagen, parámetros intrínsecos teóricos,...

5.2.6. GPS NEO 6M

Explicar el módulo GPS pruebas, alcance... tarda en coger señal, la luz azul...

5.2.7. Google Coral USB

Utilidades, el nivel de cómputo que llega,... inferencias por segundo, tipo de modelos compatible...

5.2.8. Powerbank

Todo el día encendida y ejecutando, aguanta perfectamente...

5.3. Bocetos

incluir los bocetos hechos a papel

incluir la maqueta creada con cartón ya que no disponía de una impresora 3D

5.4. Diseño CAD

Versión 1

Se decidió diseñar una pieza sólida para facilitar a las personas que no tuvieran muchos conocimientos sobre la materia pero iba a ser muy complicado para imprimirlo

Versión 2

Se decidió dividir en 4 piezas que tienen distintas finalidades:

5.4.1. Pieza base

Esta parte es la que se encuentran los motores de las ruedas y de la cámara. También, he diseñado un rectángulo para poner la rueda loca que va pegada.

Los 4 rectángulos que hay en los lados de la parte superior, se usa para poder pasar los cables y que no quede feo estéticamente desde fuera. Los 4 círculos son para poner posteriormente los tornillos y sujetar la parte superior.

5.4.2. Pieza cámara

La cámara va sujetada de forma diagonal, ya que no hace falta poner los 4 tornillos. Esto ocurre tanto en la parte de la cámara como en la base del servo que usa.

5.4.3. Pieza sujeción trasera

He creado esta prolongación que va fija con un tornillo para evitar que la batería se salga si el terreno no es regular. Tras imprimir y ensamblar la pieza, ha quedado así:

5.4.4. Pieza batería

Esta pieza está diseñada para alojar en su interior una powerbank y he cread unas aberturas para poder sacar la powerbank cuando sea necesaria.

Los huecos laterale son para almacenar los cables y poder unir esta pieza con la base.

En su parte superior, hay 12 agujeros para poder ensamblar con tornillos: raspberry pi, módulo GPS y la antena.

5.5. Impresión y montaje

Dificultades imprimiendo: con la impresora del instituto. Incluir características de la impresora y de la impresión usada.

Impresión de Gonzalo Características:

Impresora FDM Creality Ender3 V2 Slicer Software: UltiMaker Cura

QUALITY: Layer height: 0.2 mm Line width: 0.4 mm

WALLS: Wall thickness: 0.8 mm Wall line count: 2 Z seam alignment: "Sharpest corner" Seam corner preference: "Smart hiding"

INFILL: Infill density: 15Infill pattern: "Gyroid"

SPEED: Print speed: 50 mm/s Initial layer speed: 20 mm/s

Incluir una lista de los tornillos usados, hama beads...

Incluir imagen completa que incluya el Google Coral USB

5.6. Snippets

Puede resultar interesante, para clarificar la descripción, mostrar fragmentos de código (o *snippets*) ilustrativos. En el Código 5.1 vemos un ejemplo escrito en C++.

```
void Memory::hypothesizeParallelograms () {
    for(it1 = this->controller->segmentMemory.begin(); it1++) {
        squareFound = false; it2 = it1; it2++;
        while ((it2 != this->controller->segmentMemory.end()) && (!squareFound))
        {
            if (geometry::haveACommonVertex((*it1), (*it2), &square)) {
                dist1 = geometry::distanceBetweenPoints3D ((*it1).start, (*it1).end);
                dist2 = geometry::distanceBetweenPoints3D ((*it2).start, (*it2).end);
            }
        // [...]
```

Código 5.1: Función para buscar elementos 3D en la imagen

En el Código 5.2 vemos un ejemplo escrito en Python.

```
def mostrarValores():
    print (w1.get(), w2.get())

master = Tk()
w1 = Scale(master, from_=0, to=42)
w1.pack()
w2 = Scale(master, from_=0, to=200, orient=HORIZONTAL)
w2.pack()
Button(master, text='Show', command=mostrarValores).pack()

mainloop()
```

Código 5.2: Cómo usar un Slider

5.7. Verbatim

Para mencionar identificadores usados en el código —como nombres de funciones o variables— en el texto, usa el entorno literal o verbatim `hypothesizeParallelograms()`. También se puede usar este entorno para varias líneas, como se ve a continuación:

```
void Memory::hypothesizeParallelograms () {
    // add your code here
}
```

5.8. Ecuaciones

Si necesitas insertar alguna ecuación, puedes hacerlo. Al igual que las figuras, no te olvides de referenciarlas. A continuación se exponen algunas ecuaciones de ejemplo: Ecuación 5.1 y Ecuación 5.2.

$$H = 1 - \frac{\sum_{i=0}^N \frac{(\frac{d_{js} + d_{je}}{2})}{N}}{M} \quad (5.1)$$

Ecuación 5.1: Ejemplo de ecuación con fracciones

$$v(\text{entrada}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \epsilon_t < 0,1 \\ K_p \cdot (T_t - T) & \text{if } 0,1 \leq \epsilon_t < M_t \\ K_p \cdot M_t & \text{if } M_t < \epsilon_t \end{cases} \quad (5.2)$$

Ecuación 5.2: Ejemplo de ecuación con array y letras y símbolos especiales

5.9. Tablas o cuadros

Si necesitas insertar una tabla, hazlo dignamente usando las propias tablas de L^AT_EX, no usando pantallazos e insertándolas como figuras... En el Cuadro 5.1 vemos un ejemplo.

Parámetros	Valores
Tipo de sensor	Sony IMX219PQ[7] CMOS 8-Mpx
Tamaño del sensor	3.674 x 2.760 mm (1/4" format)
Número de pixels	3280 x 2464 (active pixels)
Tamaño de pixel	1.12 x 1.12 um
Lente	f=3.04 mm, f/2.0
Ángulo de visión	62.2 x 48.8 degrees
Lente SLR equivalente	29 mm

Cuadro 5.1: Parámetros intrínsecos de la cámara

En los textos puedes poner palabras en *cursiva*, para aquellas expresiones en sentido *figurado*, palabras como *robota*, que está fuera del diccionario castellano, o bien para

resaltar palabras de una colección: *(a)* es la primera letra del abecedario, *(b)* es la segunda, etc.

Al poner las dos líneas del anterior párrafo, este aparecerá separado del anterior. Si no las pongo, los párrafos aparecerán pegados. Sigue el criterio que consideres más oportuno.

5.10. Segunda sección

No olvides incluir imágenes y referenciarlas, como la Figura 5.1.



Figura 5.1: Robot aspirador Roomba de iRobot.

Ni tampoco olvides de poner las URLs como notas al pie. Por ejemplo, si hablo de la Robocup¹.

5.10.1. Números

En lugar de tener secciones interminables, como la Sección 1.1, divídelas en subsecciones.

Para hablar de números, mételos en el entorno *math* de L^AT_EX, por ejemplo, $1,5Kg$. También puedes usar el símbolo del Euro como aquí: 1.500€ .

5.10.2. Listas

Cuando describas una colección, usa *itemize* para ítems o *enumerate* para enumerados. Por ejemplo:

- *Entorno de simulación.* Hemos usado dos entornos de simulación: uno en 3D y otro en 2D.

¹<http://www.robocup.org>

- *Entornos reales.* Dentro del campus, hemos realizado experimentos en Biblioteca y en el edificio de Gestión.
 1. Primer elemento de la colección.
 2. Segundo elemento de la colección.

Referencias bibliográficas Cita, sobre todo en este capítulo, referencias bibliográficas que respalden tu argumento. Para citarlas basta con poner la instrucción `\cite` con el identificador de la cita. Por ejemplo: libros como [Vega et al., 2012], artículos como [Vega and Cañas, 2019], URLs como [Vega, 2019], tesis como [Vega, 2018a], congresos como [Vega, 2018b], u otros trabajos fin de grado como [Vega, 2008].

Las referencias, con todo su contenido, están recogidas en el fichero `bibliografia.bib`. El contenido de estas referencias está en formato BibTeX. Este formato se puede obtener en muchas ocasiones directamente, desde plataformas como `Google Scholar` u otros repositorios de recursos científicos.

Existen numerosos estilos para reflejar una referencia bibliográfica. El estilo establecido por defecto en este documento es APA, que es uno de los estilos más comunes, pero lo puedes modificar en el archivo `memoria.tex`; concretamente, cambiando el campo `apalike` a otro en la instrucción `\bibliographystyle{apalike}`.

Y, para terminar este capítulo, resume brevemente qué vas a contar en los siguientes.

Capítulo 6

Conclusiones

Quizás algún fragmento de libro inspirador...

Autor, Título

Escribe aquí un párrafo explicando brevemente lo que vas a contar en este capítulo, que básicamente será una recapitulación de los problemas que has abordado, las soluciones que has prouesto, así como los experimentos llevados a cabo para validarlos. Y con esto, cierras la memoria.

6.1. Conclusiones

Enumera los objetivos y cómo los has cumplido.

Enumera también los requisitos implícitos en la consecución de esos objetivos, y cómo se han satisfecho.

No olvides dedicar un par de párrafos para hacer un balance global de qué has conseguido, y por qué es un avance respecto a lo que tenías inicialmente. Haz mención expresa de alguna limitación o peculiaridad de tu sistema y por qué es así. Y también, qué has aprendido desarrollando este trabajo.

Por último, añade otro par de párrafos de líneas futuras; esto es, cómo se puede continuar tu trabajo para abarcar una solución más amplia, o qué otras ramas de la investigación podrían seguirse partiendo de este trabajo, o cómo se podría mejorar para conseguir una aplicación real de este desarrollo (si es que no se ha llegado a conseguir).

6.2. Corrector ortográfico

Una vez tengas todo, no olvides pasar el corrector ortográfico de L^AT_EXa todos tus ficheros *.tex*. En Windows, el propio editor TeXworks incluye el corrector. En Linux, usa aspell ejecutando el siguiente comando en tu terminal:

```
aspell --lang=es --mode=tex check capitulo1.tex
```

Bibliografía

- [Ahmed et al., 2022] Ahmed, A., Ashfaque, M., Ulhaq, M. U., Mathavan, S., Kamal, K., and Rahman, M. (2022). Pothole 3d reconstruction with a novel imaging system and structure from motion techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(5):4685–4694.
- [Allouch et al., 2017] Allouch, A., Koubâa, A., Abbes, T., and Ammar, A. (2017). Roadsense: Smartphone application to estimate road conditions using accelerometer and gyroscope. *IEEE Sensors Journal*, 17(13):4231–4238.
- [Barceló, 2004] Barceló, M. (2004). De nuevo los robots. *Paradojas*, (64):1–2.
- [Bidaud, 2017] Bidaud, P. (2017). Les robots et les hommes. page 40.
- [Bruno et al., 2023] Bruno, S., Loprencipe, G., Di Mascio, P., Cantisani, G., Fiore, N., Polidori, C., D’Andrea, A., and Moretti, L. (2023). A robotized raspberry-based system for pothole 3d reconstruction and mapping. *Sensors*, 23(13).
- [Cuenca Sánchez et al., 2023] Cuenca Sánchez, A., Farinango Galeano, W., and Murillo Zambrano, J. (2023). Diseño de un sistema de generación microhidráulica basado en un tornillo de arquímedes. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (29):98–107.
- [Dhiman and Klette, 2020] Dhiman, A. and Klette, R. (2020). Pothole detection using computer vision and learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(8):3536–3550.
- [Du et al., 2020] Du, R., Qiu, G., Gao, K., Hu, L., and Liu, L. (2020). Abnormal road surface recognition based on smartphone acceleration sensor. *Sensors*, 20(2).
- [Earnest, 2012] Earnest, L. (2012). The stanford cart. Consultado el 19 de julio de 2024.

- [El Zaatari et al., 2019] El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., and Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116:162–180.
- [Giri, 2020] Giri, L. A. (2020). Máquinas térmicas desde la antigüedad al siglo xvii: análisis histórico desde la filosofía de la técnica.
- [Katsamenis et al., 2022] Katsamenis, I., Bimpas, M., Protopapadakis, E., Zafeiropoulos, C., Kalogerias, D., Doulamis, A., Doulamis, N., Martín-Portugués Montoliu, C., Handanos, Y., Schmidt, F., Ott, L., Cantero, M., and Lopez, R. (2022). Robotic maintenance of road infrastructures: The heron project. In *Proceedings of the 15th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, PETRA '22, page 628–635, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Kim et al., 2022] Kim, Y.-M., Kim, Y.-G., Son, S.-Y., Lim, S.-Y., Choi, B.-Y., and Choi, D.-H. (2022). Review of recent automated pothole-detection methods. *Applied Sciences*, 12(11).
- [Llopis Castelló and Pérez Zuriaga, 2020] Llopis Castelló, D. and Pérez Zuriaga, A. M. (2020). Deterioros en pavimentos urbanos.
- [Nilsson et al., 1984] Nilsson, N. J. et al. (1984). *Shakey the robot*, volume 323. Sri International Menlo Park, California.
- [Park et al., 2021] Park, S.-S., Tran, V.-T., and Lee, D.-E. (2021). Application of various yolo models for computer vision-based real-time pothole detection. *Applied Sciences*, 11(23).
- [Plaza, 2023] Plaza, J. M. C. (2022-2023). Robótica de servicio: Robots de limpieza. Consultado el 19 de julio de 2024.
- [Shaw and Pathak, 2024] Shaw, K. and Pathak, D. (2024). LEAP hand v2: Dexterous, low-cost anthropomorphic hybrid rigid soft hand for robot learning. In *2nd Workshop on Dexterous Manipulation: Design, Perception and Control (RSS)*.
- [Thorpe and Durrant-Whyte, 2003] Thorpe, C. and Durrant-Whyte, H. (2003). Field robots. In *Robotics Research: The Tenth International Symposium*, pages 329–340. Springer.

- [Ul Haq et al., 2019] Ul Haq, M. U., Ashfaque, M., Mathavan, S., Kamal, K., and Ahmed, A. (2019). Stereo-based 3d reconstruction of potholes by a hybrid, dense matching scheme. *IEEE Sensors Journal*, 19(10):3807–3817.
- [Vega, 2008] Vega, J. (2008). Navegación y autolocalización de un robot guía de visitantes. Master thesis on computer science, Rey Juan Carlos University.
- [Vega, 2015] Vega, J. (2015). De la tiza al robot. Technical report.
- [Vega, 2018a] Vega, J. (2018a). *Educational framework using robots with vision for constructivist teaching Robotics to pre-university students*. Doctoral thesis on computer science and artificial intelligence, University of Alicante.
- [Vega, 2018b] Vega, J. (2018b). JdeRobot-Kids framework for teaching robotics and vision algorithms. In *II jornada de investigación doctoral*. University of Alicante.
- [Vega, 2019] Vega, J. (2019). El profesor Julio Vega, finalista del concurso 'Ciencia en Acción 2019'. URJC, on-line newspaper interview.
- [Vega and Cañas, 2019] Vega, J. and Cañas, J. (2019). PyBoKids: An innovative python-based educational framework using real and simulated Arduino robots. *Electronics*, 8:899–915.
- [Vega et al., 2012] Vega, J., Perdices, E., and Cañas, J. (2012). *Attentive visual memory for robot localization*, pages 408–438. IGI Global, USA. Text not available. This book is protected by copyright.
- [Wang et al., 2023] Wang, N., Dong, J., Fang, H., Li, B., Zhai, K., Ma, D., Shen, Y., and Hu, H. (2023). 3d reconstruction and segmentation system for pavement potholes based on improved structure-from-motion (sfm) and deep learning. *Construction and Building Materials*, 398:132499.
- [Wanli Ye and Xiao, 2021] Wanli Ye, Wei Jiang, Z. T. D. Y. and Xiao, J. (2021). Convolutional neural network for pothole detection in asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22(1):42–58.