



GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada

Curso académico 2024-2025

Trabajo Fin de Grado

Robot de bajo coste para el mantenimiento de carreteras

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 licenciante.
- *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 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 de 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. Gracias también a Ángela, Roberto y Lío por aparecer antes de esta aventura y por seguir estando ahí contra viento y marea. Os quiero mucho a todos.

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

Chozas de Canales, 26 de Noviembre de 2024

Julia López Augusto

Resumen

La robótica es el campo de la ingeniería que se enfoca en el diseño, la construcción y la programación de robots. De todos los tipos de robots que existen, interesa destacar a los robots de campo que son capaces de operar en entornos no estructurados y difíciles, pero son de elevado coste. Es por ello que la robótica de bajo coste, campo creado para hacer robots económicos, accesibles y fáciles de producir, permita ser una solución a este problema.

Las carreteras son una de las infraestructuras que necesitan un constante mantenimiento y que ello conlleva un reto logístico y económico. Además, ese mantenimiento siempre ha dependido de un equipo de trabajadores expuestos a altos riesgos mientras realizan tareas laboriosas.

El presente trabajo pretende solucionar este problema diseñando un robot que permita la detección de baches y se calcule su volumen estimado, todo ello almacenado en una interfaz web, para que la persona de mantenimiento pueda operar cuando estime oportuno.

El diseño en 3D se ha realizado usando herramientas de *software* libre, su impresión se ha hecho en cualquiera impresora convencional y sus componentes *hardware* se pueden encontrar fácilmente en internet. Además, se ha desarrollado una versión de este robot en simulación, a la que se le ha insertado un sistema creado con ROS 2 control. Por otro lado, para el robot físico se decidió desarrollar software para conseguir el objetivo principal, usando distintas tecnologías y técnicas como: el aprendizaje supervisado, TPU, filtros de imagen, el modelo pinhole, el algoritmo de la lazada, VFF, servidores web, entre otros.

Para conseguirlo se han realizado numerosos experimentos, evaluando cada componente tanto de forma individual como mostrando dos posibles soluciones completas. Una de esas soluciones es manejar el robot de forma teleoperada y la otra es que el robot se mueva de forma autónoma, usando una carretera adaptada como su medio de referencia.

Abstract

Es lo mismo que el resumen pero en inglés

Acrónimos

SRI *Stanford Research Institute*

BSA *Backtracking Spiral Algorithm*

FLL *First Lego League*

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*

CLI *Command Line Interface*

YOLO *You Only Look Once*

RCE *Red de Carreteras del Estado*

DIY *Do It by Yourself*

URDF *Unified Robot Description Format*

mAP *Mean Average Precision*

EMA *Media Móvil Exponencial*

HRI *Interacción Humano-Robot*

VFF *Virtual Force Field*

TPU *Unidades de Procesamiento Tensorial*

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	6
1.3. Robots de bajo coste	8
2. Estado del arte	12
3. Objetivos	20
3.1. Descripción del problema	20
3.2. Requisitos	21
3.3. Competencias	22
3.3.1. Competencias empleadas	22
3.3.2. Competencias adquiridas	23
3.4. Metodología	24
3.5. Plan de trabajo	24
4. Plataforma de desarrollo	27
4.1. Hardware	27
4.1.1. Raspberry Pi 4	27
4.1.2. Raspberry PiCamera	28
4.1.3. GPS NEO 6M	29
4.1.4. Sevomotor estándar Parallax	29

4.1.5. Ruedas	29
4.1.6. Google Coral USB	30
4.1.7. Power bank	31
4.1.8. Rueda loca	32
4.1.9. Ordenador principal	32
4.2. Software	33
4.2.1. Ubuntu	33
4.2.2. FreeCAD	34
4.2.3. Python	35
4.2.4. OpenCV	36
4.2.5. ROS 2	37
4.2.6. Gazebo	38
4.2.7. Herramientas de monitorización	39
4.2.8. Google Colaboratory	39
4.2.9. YOLOv8	40
4.2.10. TensorFlow Lite	40
4.2.11. Interfaz Web	41
5. Diseño y construcción del robot	42
5.1. Geometría del robot	42
5.2. Disposición de los componentes hardware	44
5.3. Bocetos	45
5.4. Diseño CAD	47
5.4.1. Chasis	48
5.4.2. Soporte de la cámara	48
5.4.3. Carcasa	49
5.4.4. Sujeción trasera	51
5.5. Impresión y montaje	51
6. Soporte software del robot	57

6.1.	Simulación	57
6.1.1.	URDF/Xacro	57
6.1.2.	ROS 2 Control	59
6.1.3.	Robot State Publisher	60
6.1.4.	Launcher	61
6.1.5.	Ejecución en simulador	62
6.2.	Componentes del robot real	64
6.2.1.	Cámara	64
6.2.2.	Google Coral USB	67
6.2.3.	Módulo GPS	67
6.2.4.	Servomotores	68
6.3.	Comportamiento del robot real	70
6.3.1.	Red neuronal para la detección de baches	70
6.3.2.	Modelo de cámara pinhole	75
6.3.3.	Algoritmo de la lazada	78
6.3.4.	Interfaz Web	79
6.3.5.	Autónomo	80
7.	Experimentos	85
7.1.	Impresión 3D	85
7.2.	Ruedas	86
7.3.	Detección de baches	87
7.3.1.	Obtención del contorno y coordenadas del bache	88
7.4.	Modelo de cámara pinhole	88
7.5.	Algoritmo de la lazada	90
7.6.	VFF	91
7.7.	Ejecución completa de la aplicación	92
7.7.1.	Teleoperado	92
7.7.2.	Autónomo	93

8. Conclusiones	94
8.1. Objetivos y requisitos cumplidos	94
8.1.1. Objetivos	94
8.1.2. Requisitos	95
8.2. Habilidades desarrolladas	96
8.3. Líneas futuras	97
A. Configuración de PiBotJ	98
A.1. Simulación	98
A.2. Robot real	99
A.2.1. Cámara	99
A.2.2. Google Coral	100
A.2.3. Módulo GPS	101
A.2.4. Servomotores	104
Bibliografía	105

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 campo	7
1.9.	Mano antropomórfica híbrida rígida y suave	9
1.10.	Clasificación de deterioros	10
2.1.	Robot usado para la reconstrucción 3D de baches	13
2.2.	Proyecto HERON	14
2.3.	Visualización de la señal en un mapa en eyesNroad	15
2.4.	Plataforma robótica diseñada para el sellado de grietas	17
3.1.	Método PDCA	25
4.1.	Raspberry Pi 4 ²⁶	28
4.2.	Raspberry PiCamera V2 ²⁷	28
4.3.	Módulo GPS NEO 6M ²⁸	29
4.4.	Servomotor Parallax ²⁹	30
4.5.	Ruedas utilizadas	30
4.6.	Google Coral USB ³²	31

4.7. Xiaomi power bank ³³	31
4.8. Rueda loca ³⁴	32
4.9. ASUS VivoBook 14 ³⁵	32
4.10. Logo de Freecad	34
4.11. Sentencias NMEA capturadas del GPS	36
4.12. Logo de OpenCV	36
4.13. Distribuciones de ROS 2 usadas	37
4.14. Logo de Google Colab	40
4.15. Logo de TensorFlow Lite	41
5.1. PiBot	43
5.2. PiBot con cámara modificada	43
5.3. Esquema de los grados de libertad de PiBot	44
5.4. Esquema de conexiones del PiBotJ	45
5.5. Bocetos creados a mano	46
5.6. Maqueta creada	46
5.7. Planos de los componentes	47
5.8. Distintas vistas del chasis	49
5.9. Inclinación de la cámara	49
5.10. Distintas vistas del soporte de la cámara	50
5.11. Distintas vistas de la carcasa	50
5.12. Distintas vistas de la pieza para la sujeción trasera	51
5.13. Impresora FDM Creality Ender3 V2 ⁶⁷	52
5.14. Piezas impresas	53
5.15. Soldando pines al módulo GPS	53
5.16. Robot completo montado en FreeCAD	54
5.17. Ensamblaje ruedas azules genéricas	55
5.18. Robot con distintos tipos de ruedas	56
6.1. Sistemas de Coordenadas de PiBotJ	59

6.2. Interfaces que tiene definidas PiBotJ	60
6.3. Diagrama de robot_state_publisher	60
6.4. Esquema de launch_sim.launch.py	61
6.5. Topics disponibles al lanzar el robot	62
6.6. Herramientas usadas	63
6.7. Herramienta usada para visualizar los valores del GPS	63
6.8. Herramienta usada para rotar la cámara	63
6.9. Cámara de PiBotJ en funcionamiento	65
6.10. Media de la matriz de intrínsecos	66
6.11. Parámetros extrínsecos	66
6.12. Valores publicados de latitud y longitud captados del GPS	67
6.13. Demostración de una correcta localización	68
6.14. Diagrama para la posición central del servo	69
6.15. Distintas direcciones de PiBotJ	69
6.16. Gráficas de resultados del entrenamiento	70
6.17. Gráficas de resultados del entrenamiento: métricas	71
6.18. Demostración del modelo funcionando	72
6.19. Contorno del baches detectados	76
6.20. Funcionamiento de una cámara esteneopeica ¹²⁴	76
6.21. Relación de fórmulas del modelo pinhole	77
6.22. Sistemas de coordenadas	77
6.23. La hipótesis suelo asume que todos los objetos están en el suelo	78
6.24. Demostración del algoritmo de la lazada	79
6.25. Interfaz web	80
6.26. Conversión de medidas de la carretera	81
6.27. Carretera creada en cartulina	81
6.28. Filtro resultante aplicado para la detección de líneas	82
6.29. Distintos casos de la detección de líneas	83
6.30. Diagrama de fuerzas del algoritmo VFF	84

7.1.	Versiones previas de impresión	85
7.2.	Capturas de las pruebas de PiBotJ con las distintas ruedas	86
7.3.	Parte de la configuración usada para el entrenamiento	87
7.4.	Primera versión en la obtención del contorno del bache	89
7.5.	Versión final en la obtención del contorno del bache	89
7.6.	Captura del video que demuestra el modelo pinhole	90
7.7.	Medidas del bache	91
7.8.	Captura del vídeo que calcula el área usando el algoritmo de la lazada .	91
7.9.	Esquema de nodos para el modo teleoperado	92
7.10.	Esquema de nodos para el modo autónomo	93
A.1.	Dispositivos de video y media disponibles en PiBotJ	100
A.2.	Configuración exitosa del Google Coral	101

Listado de códigos

6.1.	Macro que define <i>fixed joint</i>	58
6.2.	Cómo convertir los datos del modelo a un formato adecuado	75
6.3.	Filtro para obtener las líneas blancas	82
7.1.	Cómo obtener el contorno del bache	89

Listado de ecuaciones

6.1.	Fórmula para calcular la distancia focal teórica	65
6.2.	Fórmula para calcular el centro de la imagen	65
6.3.	Fórmula de la media móvil exponencial	74
6.4.	Fórmula del algoritmo de la lazada	79
6.5.	Ecuación de VFF	83
7.1.	Fórmula para calcular el área de una elipse	90

Índice de cuadros

2.1. Ventajas y desventajas de los métodos de detección de baches	18
4.1. Especificaciones técnicas del ordenador usado	33
4.2. Diferencias entre Ubuntu 20.04 y Ubuntu 22.04	34
5.1. Características usadas para la impresión	52
5.2. Tornillería necesaria	54
5.3. Coste proyecto	56
7.1. Características usadas en impresiones previas	86

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.

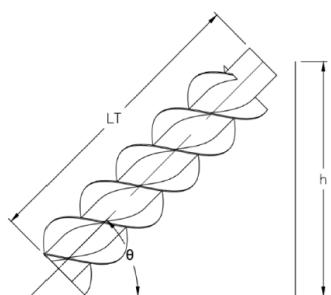
Desde la antigüedad se han desarrollado ingenios o autómatas, de los cuales muchos de ellos tenían fines religiosos, como los mostrados en la Figura 1.1.

Estatuas de Memnon ¹Guerreros de Terracota ²

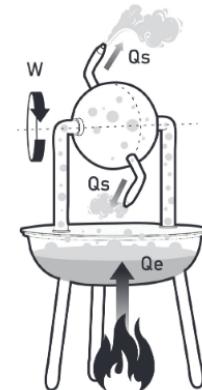
Figura 1.1: Ingenios de la antigüedad con fines religiosos

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 fomentó las investigaciones, ya que este movimiento trataba de dar importancia a la

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

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

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*, ensamble 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 derecha). Dentro del mercado de los robots industriales se puede ver que tiene proveedores asentados como KUKA³ o ABB⁴.



Brazo robot ABB IRB 140 ⁵



Cobot

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 mapas para poder navegar y poder localizarse. También usan algoritmos sofisticados, como navegación de cobertura por barridos sistemáticos BSA, y se componen de

³<https://www.kuka.com/es-es>

⁴<https://new.abb.com/es>

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

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.

1.2. Robots de campo

En [Thorpe and Durrant-Whyte, 2003] se define a los robots de campo como la automatización de plataformas terrestres, marítimas y aéreas en aplicaciones como la

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

minería, la agricultura, las carreteras, la exploración planetaria 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, difíciles y a menudo, sin supervisión humana.

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 1.8 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.

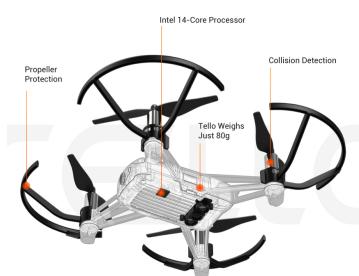
TX Robotic Strawberry
Harvester ¹²FrontRunner
Autonomous Haulage
System (AHS) ¹³Drone Tello ¹⁴Perseverance ¹⁵

Figura 1.8: 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 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 1.9 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].

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.

¹²<https://advanced.farm/technology/strawberry-harvester/>

¹³<https://www.komatsu.com/en/technology/smart-mining/loading-and-haulage-autonomous-haulage-system/>

¹⁴<https://www.ryzerobotics.com/es/tello>

¹⁵<https://es.wikipedia.org/wiki/Perseverance>



Figura 1.9: Mano antropomórfica híbrida rígida y suave

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. El pavimento puede ser flexible, semiflexible y semirrígido urbano, y los deterioros existentes los podemos clasificar de forma resumida en la Figura 1.10.



Figura 1.10: Clasificación de deterioros

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 tipos de deterioros que existen 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. 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 Infrarob¹⁶ 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 PiCamera y el módulo GPS NEO-6M, que también es *low-cost*.

¹⁶<https://infrarobproject.com/>



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

- *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.

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 HERON¹⁷ 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

¹⁷<https://www.heron-h2020.eu/>

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)



Figura 2.2: Proyecto HERON

Las ventajas de este proyecto son las siguientes:

- *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 *Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras* (ACEX) (año 2024)¹⁸, que ha resultado ganadora 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:

¹⁸<https://www.acex.eu/candidatura-3-4/>

- *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.

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)¹⁹, que ha resultado ganadora en la en la categoría asociados. Puedes ver su aspecto en la Figura 2.4.

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.
- *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.

¹⁹<https://www.acex.eu/candidatura-12-5/>



Figura 2.4: Plataforma robótica diseñada para el sellado de grietas

- *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.

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 el smartphone Samsung 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 Carreteras²⁰.

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

²⁰https://conservacion.es/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=101

un robot que, usando materiales de bajo coste, sea capaz de navegar por las carreteras, detectar los baches que vaya encontrando y sea capaz de estimar el área del bache para hacer una estimación media del volumen que ocupa dicho bache y poder 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 ROS 2.

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 sintetizan 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 Scholar²¹, Web of Science del FECYT²² que está basa en Web of Science de Clarivate²³, y otras relacionadas con el mantenimiento

²¹<https://scholar.google.es/>

²²<https://www.webofscience.com/wos/alldb/basic-search>

²³<https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/>



Figura 3.1: Método PDCA

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 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 al 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 GitHub²⁴. Además, todo el trabajo diario está documentado en el apartado Wiki²⁵ 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.

²⁴<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez>

²⁵<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 a 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. Siguiendo la filosofía *low-cost* y *Do It by Yourself* (DIY), se ha primado el conseguir el menor coste de cada componente.

4.1.1. Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi es una computadora de bajo coste y, con su tamaño compacto, es ideal para proyectos de electrónica, programación y educación. 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 la 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 4²⁶

4.1.2. Raspberry PiCamera

Esta cámara (Figura 4.2) tiene un tamaño de 23,86 x 25 x 9 mm, 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. Para conectarse, usa un cable plano diseñado específicamente para el puerto CSI de la placa. Su coste aproximado es de 18€.



Figura 4.2: Raspberry PiCamera V2²⁷

²⁶<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

²⁷<https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>

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€. Tiene una precisión de aproximadamente 2,5 metros en condiciones abiertas. Soporta hasta veintidós satélites simultáneamente, lo que le permite ofrecer posicionamiento (latitud, longitud, altitud y velocidad) confiable y estable. Asimismo, utiliza comunicación por *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UART), comúnmente a 9.600 bps, lo que facilita su integración con muchas placas del mercado.



Figura 4.3: Módulo GPS NEO 6M²⁸

4.1.4. Sevomotor estándar Parallax

Este tipo de servo (Figura 4.4) tiene un rango de rotación de 0 a 180 grados y se puede controlar digitalmente mediante la técnica de *Pulse Width Modulation* (PWM) con un pulso alto de 0,75–2,25 ms en intervalos de 20 ms. Este tipo de servo es muy común en aplicaciones de animatrónica y robótica. Su precio ronda los 17€.

4.1.5. Ruedas

Para implementar las ruedas del prototipo robótico de este proyecto se decidió tomar las ruedas del kit robótico *ActivityBot*, que usa unas ruedas compatibles con los motores descritos anteriormente, además de ser muy ligeras y estables. Se trata de una rueda de plástico con neumático tipo junta tórica (Figura 4.5 izquierda). El perfil estrecho convierte a esta rueda en ideal para aplicaciones que requieren una dirección precisa, y el diámetro de la rueda es de 66 mm. También se pueden adquirir individualmente, con un coste de 4,54€ la unidad.

²⁸<https://www.u-blox.com/en/product/neo-6-series>

²⁹<https://www.parallax.com/product/parallax-standard-servo/>



Figura 4.4: Servomotor Parallax²⁹

Para enriquecer el proyecto, se han empleado otro tipo de ruedas cuyo diámetro es igual a las ruedas del *ActivityBot* pero el grosor del neumático es superior y tiene un mayor agarre sobre la superficie. En este caso son ruedas con el neumático azul (Figura 4.5 derecha) pero existen de muchos tipos y con precio similar a las ruedas *ActivityBot*.



Rueda *ActivityBot* ³⁰



Rueda azul genérica ³¹

Figura 4.5: Ruedas utilizadas

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. 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

³⁰https://es.rs-online.com/web/p/accesorios-para-kits-de-desarrollo/8430897?srsltid=AfmB0orv3a6_tQNdqAoKx_21Mn1m2MAum68oApyvr5mq8ExPTuh_CVNy

³¹<https://es.aliexpress.com/item/1005005145020093.html>

preentrenados en TensorFlow Lite, la versión ligera de TensorFlow diseñado para dispositivos con recursos limitados. Al ser una placa lanzada hace varios años al mercado, sólo es compatible con las versiones de Python 3.6 hasta la 3.9.

Por sus cualidades descritas, se ha decidido este componente para mejorar la detección de baches en tiempo real y solventar las limitaciones de la Raspberry Pi. Su precio es de unos 65€.



Figura 4.6: Google Coral USB³²

4.1.7. Power bank

Para poder alimentar a todos los componentes se ha incluido en el prototipo robótico una *power bank* de gran capacidad para que permita la autonomía del robot durante un tiempo más que razonable. Concretamente, se ha elegido la Xiaomi Redmi Power Bank de 20000 mAh, cuyas dimensiones son: 73,6 x 27,3 x 154 mm y después de muchos ciclos de carga y descarga, mantienen un buen rendimiento sin perder demasiada capacidad. Su precio ronda los 20€.



Figura 4.7: Xiaomi power bank³³

³²<https://coral.ai/products/accelerator/>

³³<https://ams.buy.mi.com/es/item/3202200053?&skupanel=1>

4.1.8. Rueda loca

Para poder conseguir un movimiento correcto y poder encontrar el punto de apoyo para el robot, es necesario incorporar al robot una rueda loca. Tras investigar qué rueda encajaba mejor, 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 esta es de 1,13€.



Figura 4.8: Rueda loca³⁴

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 permitiera 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.



Figura 4.9: ASUS VivoBook 14³⁵

³⁴https://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

³⁵<https://www.asus.com/es/laptops/for-home/vivobook/vivobook-14-k413/>

Características	Descripción
Pantalla	14 pulgadas Full HD (1.920x1.080) tecnología LED antirreflejo
Procesador (CPU)	Intel Core i7 de 10 ^a generación
Memoria RAM	8 GB
Almacenamiento	512 GB
Tarjeta gráfica (GPU)	Intel UHD Graphics de Comet Lake-U GT2
Sistema Operativo	Windows 10 y Ubuntu 22.04
Puertos	1x USB 3.2 Gen 1 Tipo-A 1x USB 3.2 Gen 1 Tipo-C 2x USB 2.0 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 los programas y librerías que han sido necesarios usar cumplir con los objetivos descritos en el Capítulo 3.

4.2.1. Ubuntu

Ubuntu³⁶ es una de las muchas distribuciones del sistema operativo GNU/Linux; esta, concretamente, está basada en Debian GNU/Linux, y es mantenida por Canonical Ltd. Entre todas las versiones existentes de Ubuntu, para la realización del proyecto se ha usado Ubuntu 22.04 LTS y Ubuntu 20.04 LTS. El ordenador usado (descrito en la Sección 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 la Sección 4.1.6) es compatible con versiones de Python entre 3.6 y 3.9, y en Ubuntu 22.04 la versión de Python que se instala por defecto es la 3.10, y el intento de cambiar dicha versión genera numerosos

³⁶<https://ubuntu.com/>

problemas de dependencias, sobre todo con la versión de ROS 2 usada. Asimismo, en numerosos foros aconsejaban migrar a Ubuntu 20.04³⁷ que usa Python 3.8. En el Cuadro 4.2 se muestran 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

4.2.2. FreeCAD

Esta herramienta de código abierto³⁸ (Figura 4.10) es un *software* de diseño asistido por ordenador 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

³⁷<https://robotics.stackexchange.com/questions/104413/>

³⁸<https://www.freecad.org/>

4.2.3. Python

Python³⁹ es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, ampliamente reconocido por su simplicidad y legibilidad. 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 y arrays multidimensionales, junto con una amplia colección de funciones matemáticas para realizar operaciones sobre estos arrays. Se ha usado en este proyecto para poder calcular el área del bache.

Software para localización

PyNMEA2 es una biblioteca de Python que se utiliza para analizar y generar mensajes en formato NMEA (National Marine Electronics Association) (Figura 4.11), 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.

³⁹<https://es.python.org/>

```
julioau@raspberrypi:~/Desktop/tfg-jlopez $ cat /dev/ttyAMA0
7.,,,,.5.04,2.05,4.61*0C
$GPGSV,2,1,07,08,55,313,24,10,,,33,16,55,172,28,18,02,056,*42
$GPGSV,2,2,07,23,35,053,31,26,19,162,21,27,73,041,28*49
$GPGLL,4006.17899,N,00402.83247,W,091646.00,A,A*77
$GPRMC,091647.00,A,4006.17923,N,00402.83276,W,1.467,,270624,,,A*6C
$GPVTG,,T,,M,1.467,N,2.717,K,A*24
$GPGGA,091647.00,4006.17923,N,00402.83276,W,1,04,2.05,542.2,M,50.2,M,,*44
$GPGSA,A,3,16,08,23,27,,,.5.04,2.05,4.61*0C
$GPGSV,2,1,07,08,55,313,23,10,,,32,16,55,172,28,18,02,056,*44
$GPGSV,2,2,07,23,35,053,31,26,19,162,21,27,73,041,27*46
$GPGLL,4006.17923,N,00402.83276,W,091647.00,A,A*74
```

Figura 4.11: Sentencias NMEA capturadas del GPS

En este proyecto, se van a emplear las sentencias que contengan latitud y longitud para estimar la ubicación de cada bache.

4.2.4. OpenCV

OpenCV⁴⁰ (Figura 4.12) es una biblioteca *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. En este proyecto se ha usado concretamente para la detección del bache y el cálculo del área.



Figura 4.12: Logo de OpenCV

⁴⁰<https://opencv.org/>

4.2.5. ROS 2

ROS, por sus siglas en inglés, *Robot Operating System* se trata de un conjunto de bibliotecas y herramientas que ayudan a los desarrolladores a construir sistemas robóticos. ROS proporciona servicios de nivel bajo como abstracción de *hardware*, control de dispositivos, paso de mensajes entre procesos y gestión de paquetes, así como herramientas para simulación, pruebas y desarrollo de algoritmos.

ROS 2, la segunda generación de ROS, se ha rediseñado para superar las limitaciones de su predecesor. Está basado en un nuevo middleware llamado DDS (Data Distribution Service), que permite una mejor comunicación entre nodos, mayor seguridad, y más opciones de transporte y calidad de servicio (QoS). También mejora la escalabilidad, el soporte para sistemas distribuidos y la capacidad para aplicaciones en tiempo real. Además, ROS 2 es multiplataforma e interoperable; soportando múltiples lenguajes de programación, como C++ y Python.

Según se ha explicado en la Sección 4.2.1, debido a que se ha necesitado para este proyecto usar Ubuntu 20.04 LTS y Ubuntu 22.04 LTS; se ha tenido que usar las dos distribuciones más estable de ROS para cada versión de Ubuntu: ROS 2 Foxy⁴¹ y ROS 2 Humble⁴², respectivamente (Figura 4.13).



Logo ROS 2 Foxy



Logo ROS 2 Humble

Figura 4.13: Distribuciones de ROS 2 usadas

⁴¹<https://docs.ros.org/en/foxy/Installation.html>

⁴²<https://docs.ros.org/en/humble/index.html>

ROS 2 Control

ROS 2 Control⁴³ 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:

- *Hardware Components/Interfaces*. Realizan comunicación con *hardware* físico y pueden ser: sistemas, sensores y actuadores. Cada *hardware* tendrá una serie de *command interfaces* o de *state interfaces* que permitirán monitorizar o interactuar con cada componente.
- *Resource Manager*. Abstacta y gestiona los *hardware interfaces*, permitiendo la abstracción de los *state interfaces* y los *command interfaces*.
- *Controller Manager*. Gestiona controladores e interfaces de *hardware* en el framework ROS 2 Control.
- *Controllers*. Utilizan la teoría de control para interactuar con el *hardware*. Pueden ser creados desde cero o usar los que viene por defecto de la librería de ROS 2 Control, que suplen las necesidades en la mayoría de las ocasiones.

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.

4.2.6. Gazebo

Gazebo⁴⁴ es un simulador de robots que permite modelar entornos físicos tridimensionales y probar robots en ellos sin necesidad de tener el robot 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.

⁴³https://control.ros.org/rolling/doc/getting_started/getting_started.html

⁴⁴<https://gazebosim.org/home>

4.2.7. Herramientas de monitorización

Para el desarrollo del proyecto, se emplean diversas herramientas de monitorización que permiten visualizar y controlar los datos y procesos dentro del entorno de ROS 2, y para ello se ha decidido usar las herramientas que se describen a continuación.

Rviz

RViz⁴⁵ es una herramienta de visualización en 3D utilizada en ROS y ROS 2 para representar información del sistema robótico. Permite a los usuarios ver, en tiempo real, datos como la posición de un robot, sensores, cámaras, mapas y otros elementos. Se ha utilizado para monitorear el comportamiento del robot en simulación.

RQT Image View

RQT Image View⁴⁶ 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)⁴⁷ 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 Colaboratory⁴⁸ (Figura 4.14) es 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

⁴⁵<http://wiki.ros.org/rviz>

⁴⁶http://wiki.ros.org/rqt_image_view

⁴⁷<https://docs.ros.org/en/humble/Tutorials/Beginner-CLI-Tools.html>

⁴⁸<https://colab.research.google.com/>

aprendizaje automático, la ciencia de datos y la educación. Gracias a esta herramienta, se puede cumplir el requisito nº.4 de los indicados en la Sección 3.2.



Figura 4.14: Logo de Google Colab

4.2.9. YOLOv8

YOLOv8⁴⁹ 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. Por todo lo anterior, esta herramienta ha sido elegida para el entrenamiento del modelo de detección de baches.

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. Concretamente, para poder ejecutar modelos en dispositivos como las Raspberry Pi, se usa la versión TensorFlow Lite⁵⁰ (Figura 4.15), 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.

⁴⁹<https://docs.ultralytics.com/es>

⁵⁰<https://ai.google.dev/edge/litet>



Figura 4.15: Logo de TensorFlow Lite

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 herramientas que se describen a continuación.

ROS2bridge Server

ROS2bridge Server⁵¹ 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

OpenStreetMaps⁵² es 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. Esta herramienta es utilizada en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo navegación, análisis de datos geográficos, y proyectos de código abierto relacionados con mapas y geolocalización.

Tras conocer todas las plataformas *software* y *hardware* empleadas para la realización del presente trabajo fin de grado, es el momento de describir el desarrollo completo llevado a cabo para la construcción *hardware* del robot y su correspondiente soporte *software*, lo que se explicará detalladamente en los siguientes capítulos.

⁵¹http://wiki.ros.org/rosbridge_server

⁵²<https://www.openstreetmap.org>

Capítulo 5

Diseño y construcción 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 el robot sea completamente operativo.

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. La aplicación de este proyecto se encuentra dentro de los robots de campo, y es por ello que estos tipos de robots son mayoritariamente plataformas que trabajan en entornos no estructurados, como se comentó en la Sección 1.2. Por ello, es necesario que la estructura del robot se asemeje a esos tipos de robots y los más comunes son los robots con ruedas.

Sin embargo, los robots de campo son de gran coste y de grandes dimensiones, lo que hacía inviable que entidades con recursos limitados pudieran adquirirlos. Es por ello que se decidió apostar por los robots de bajo coste. Una primera idea hasta conseguir la solución final al proyecto la tomamos del artículo, [Vega and Cañas, 2018], donde los autores nos presentan PiBot (Figura 5.1), una plataforma robótica educativa de 20 x 10 x 8 cm basada en Raspberry Pi 3 y PiCamera, diseñada para facilitar la enseñanza de robótica a estudiantes de secundaria. Ofrece una infraestructura de *software* abierta en Python y comandos de alto nivel para facilitar el aprendizaje. Además, incluye un modelo 3D imprimible y una versión simulada en Gazebo, disponibles públicamente para que estudiantes y escuelas puedan aprender y practicar robótica sin necesidad del

robot físico.



Figura 5.1: PiBot

Para poder continuar con la investigación de ese proyecto, se adquirió una unidad del robot PiBot. Además, se creó una estructura de metal para que la cámara cambiase su disposición, mirase hacia el suelo y estuviese orientada de forma natural para evitar futuros cálculos innecesarios. El diseño en este punto quedó como muestra la Figura 5.2.

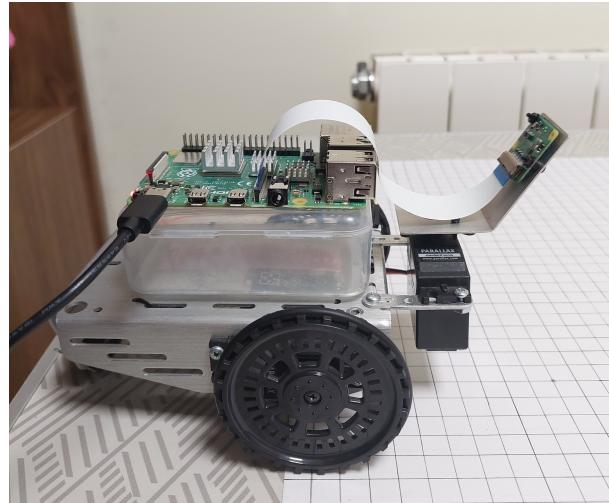


Figura 5.2: PiBot con cámara modificada

De PiBot interesa que tiene dos grados de libertad para el movimiento del robot, ya que cuenta con dos ruedas con motores independientes y una rueda loca, lo que le permite desplazarse a lo largo del eje X e Y y, por lo tanto, puede ir hacia delante y atrás y girar sobre sí mismo. Otro grado de libertad que resulta útil en PiBot para su

aplicación en este proyecto es el giro sobre el eje Z del motor sobre el que está montada la cámara, lo que le permite aumentar el campo de visión (Figura 5.3).

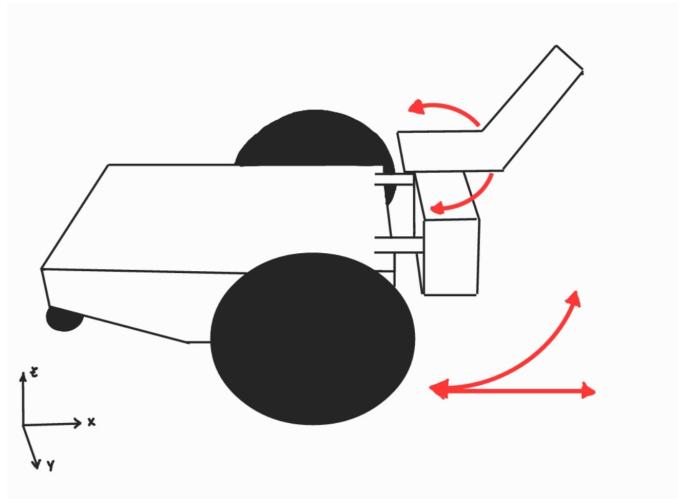


Figura 5.3: Esquema de los grados de libertad de PiBot

Una vez puesto en marcha el PiBot, se realizaron una serie de modificaciones *hardware* para poder cumplir con el objetivo principal descrito en la Sección 3.1; fue necesario añadir una serie de componentes *hardware* a PiBot para poder formar el esqueleto completo del nuevo prototipo robótico, que fue bautizado como PiBotJ. A continuación se describen detalladamente los distintos componentes *hardware*.

5.2. Disposición de los componentes hardware

Una vez conocido las características que eran útiles de PiBot para PiBotJ, se definió la disposición de los componentes *hardware*, descritos en la Sección 4.1, para poder confeccionar el esqueleto completo. La Figura 5.4 muestra todas la conexiones que fueron necesarias usar en la Raspberry Pi para dar soporte a todos los componentes del PiBotJ.

La alimentación a la placa se realiza a través del puerto USB-C. En uno de los puertos USB 3.0 se conectó el Google Coral y, en el puerto CSI, la Raspberry PiCamera. Asimismo, sobre los pines se conectaron los servomotores estándar de Parallax y el módulo GPS. Para el servomotor derecho fue necesario usar el pin 4 para el cable de alimentación, el pin 12 (GPIO 18) para el cable de la señal y el pin 6 para el cable de tierra. Para el servomotor izquierdo fue necesario usar el pin 2 para el cable de alimentación, el pin 7 (GPIO 4) para el cable de la señal y el pin 9 para el cable de tierra. Finalmente, para el módulo GPS había que conectarlo al puerto serie y fue



Figura 5.4: Esquema de conexiones del PiBotJ

necesario usar el pin 1 para el cable de la alimentación, el pin 10 (GPIO 15) para el cable de transmisión de señal (TX), el pin 8 (GPIO 14) para el cable de recepción de señal (RX) y el pin 14 para el cable de tierra.

5.3. Bocetos

La realización de bocetos es una etapa fundamental en el proceso de diseño, que se realiza antes de iniciar el modelado en 3D, ya que su propósito es obtener una visión clara de la estructura y disposición de los componentes que conforman el PiBotJ. Una vez que se definió el esqueleto completo que este necesitaba, se creó una serie de bocetos (Figura 5.5) que permitieron afinar los detalles antes de realizar el diseño en 3D.

Antes de realizar el diseño CAD de las piezas se creó una maqueta a tamaño real (Figura 5.6) para poder tener una idea de cómo sería la aplicación final y así intentar no malgastar material de impresión. Tras tener una idea clara de cómo iba a ser PiBotJ, se comenzó con el diseño de cada una de las piezas.



Figura 5.5: Bocetos creados a mano



Figura 5.6: Maqueta creada

5.4. Diseño CAD

Para hacer el diseño CAD y la maqueta explicada en el apartado anterior, se crearon unos planos a mano (Figura 5.7) de las diferentes piezas involucradas en el diseño. Las medidas fueron precisas gracias al uso del calibre.

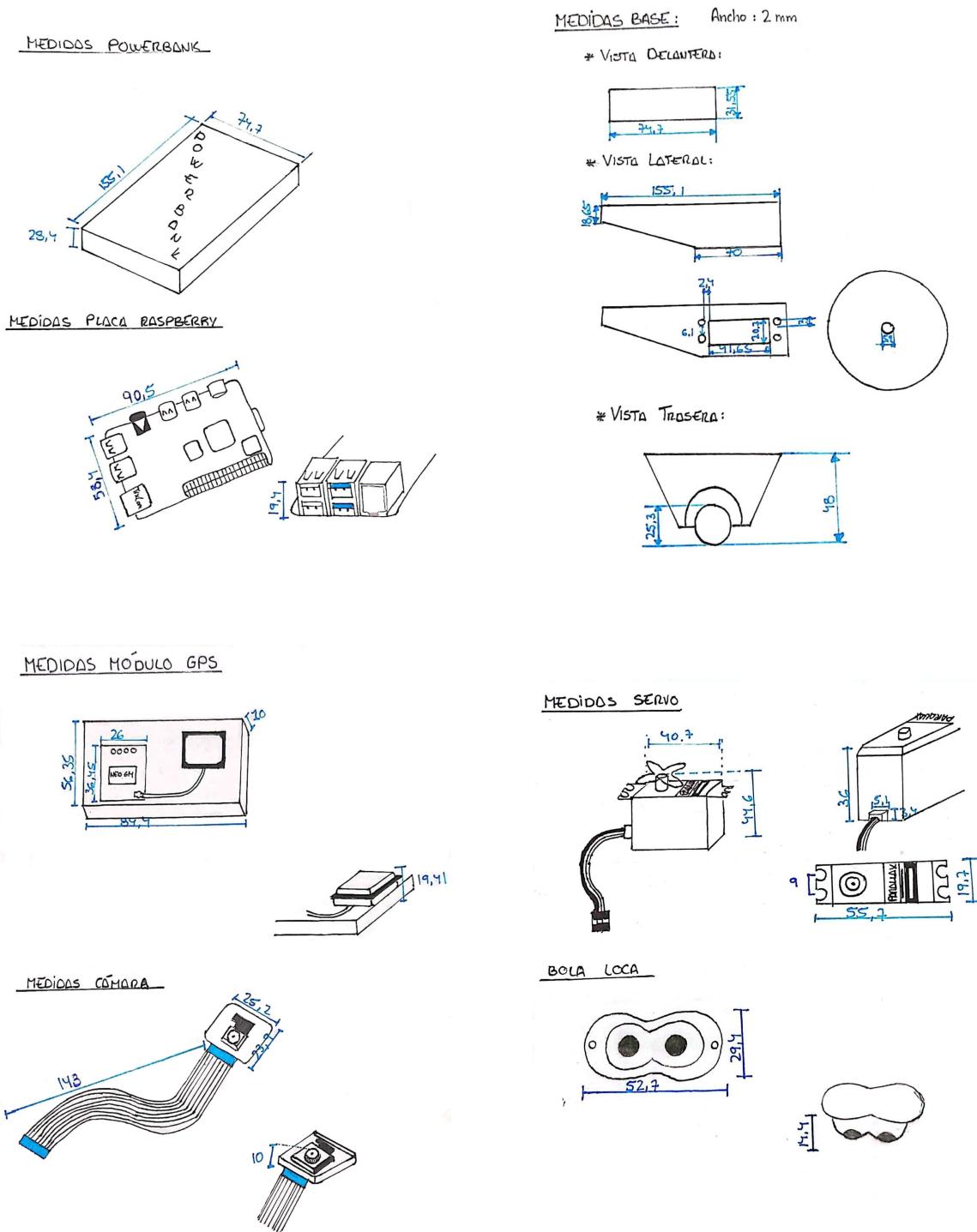


Figura 5.7: Planos de los componentes

Para el diseño de PiBotJ se empleó la herramienta de modelado FreeCAD⁵³, con el objetivo de utilizar *software* libre, permitiendo que cualquier persona pueda acceder y modificar las piezas. El diseño se dividió en cuatro partes, cada una de las cuáles tenía una finalidad específica, descritas a continuación.

Para llevar a cabo el diseño de todas las piezas se han seguido los tutoriales de dos cursos de FreeCAD: el del profesor Juan González (también conocido como *Obijuan*)⁵⁴, y el de dcahue-inginería⁵⁵, ambos fundamentales en el desarrollo del proyecto. Además, se han utilizado otros tutoriales específicos, como los dedicados a la creación de *shape binders*⁵⁶ y la realización de planos inclinados⁵⁷, esenciales para diseñar la inclinación de la cámara.

5.4.1. Chasis

La estructura principal, que da soporte al robot, fue diseñada para alojar los motores de las ruedas y de la cámara. En la parte trasera se incorporó un prisma rectangular, destinado a la colocación de la rueda loca, mientras que en el lado izquierdo se le dotó con un orificio circular para sujetar la *power bank*. En la parte superior se añadieron seis aberturas rectangulares, para permitir el paso ordenado de los cables, manteniendo una estética limpia y organizada desde el exterior.

Además, a este chasis se le dotó de cuatro orificios circulares, que permitieron fijar la carcasa mediante tornillos. Se puede encontrar tanto su versión compatible con FreeCAD⁵⁸, como con el formato de diseño 3D por excelencia, STL⁵⁹. La Figura 5.8 (izquierda) muestra el chasis, tal como será preparada para la impresión en una impresora 3D convencional. Por su parte, la Figura 5.8 (derecha) presenta nuevamente el chasis, pero esta vez equipada con los componentes de *hardware* necesarios.

5.4.2. Soporte de la cámara

Para posicionar la cámara de manera que mire hacia el suelo y pueda captar los baches, fue necesario fijarla con una rotación sobre el eje y. En este caso, dicha rotación fue de 50 grados, o 130 grados si se toma como referencia la base de la pieza que va

⁵³<https://www.freecad.org/>

⁵⁴https://www.youtube.com/watch?v=2_DbFzFV9D4

⁵⁵<https://www.youtube.com/watch?v=4zp2DrWv8Wk>

⁵⁶<https://www.youtube.com/watch?v=MCY5IrWrHrU>

⁵⁷<https://www.youtube.com/watch?v=T4hKW1mLrCw>

⁵⁸<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/base.FCStd>

⁵⁹<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/base.stl>



Figura 5.8: Distintas vistas del chasis

atornillada al motor (Figura 5.9). Esta base fue dotada con dos orificios diagonales que permiten su fijación al motor.



Figura 5.9: Inclinación de la cámara

A la parte inclinada de la pieza se le incluyó un orificio diseñado para alojar el sensor CMOS, garantizando una correcta alineación y visión. Además, esta sección fue dotada con dos orificios adicionales para asegurar el sensor CMOS y mantenerlo firmemente en su lugar. Se puede encontrar tanto su versión compatible con FreeCAD⁶⁰ como con el formato STL⁶¹. La Figura 5.10 (izquierda) muestra el soporte de la cámara, tal como será preparada para la impresión en una impresora 3D convencional. Por su parte, la Figura 5.10 (derecha) presenta nuevamente el soporte de la cámara, pero esta vez atornillado sobre los componentes *hardware* necesarios.

5.4.3. Carcasa

Esta carcasa fue diseñada para alojar la placa Raspberry Pi, el módulo GPS y la *power bank* en su interior. La cara superior fue dotada de doce orificios circulares,

⁶⁰<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/camara.FCStd>

⁶¹<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/camara.stl>



Figura 5.10: Distintas vistas del soporte de la cámara

destinados a atornillar tanto la Raspberry Pi como el módulo GPS, y seis aberturas que se conectaban con la cara inferior, alineándose con las aberturas correspondientes del chasis, para garantizar un paso de cables ordenado.

La cara inferior, además de las seis aberturas, fue dotada con cuatro orificios adicionales para permitir el atornillado del chasis. En el lateral izquierdo, la pieza se dejó abierta para facilitar la inserción de la *power bank*, mientras que en el lado derecho se añadieron dos cuadrantes que permitieron retirar la *power bank* cuando sea necesario. Esta pieza está disponible tanto en formato compatible con FreeCAD⁶² como en STL⁶³.

La Figura 5.11 (izquierda) muestra la carcasa, lista para la impresión en una impresora 3D convencional. La Figura 5.11 (derecha) presenta nuevamente la carcasa, pero equipada con los componentes *hardware* necesarios.

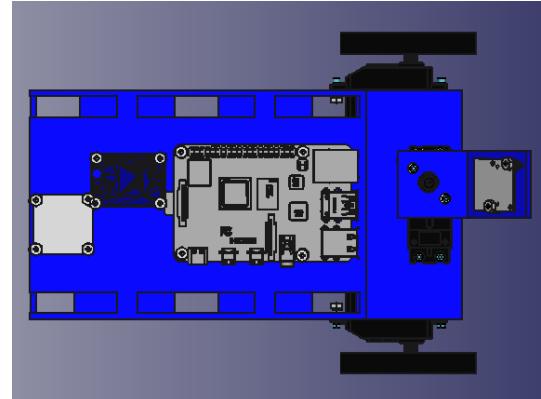
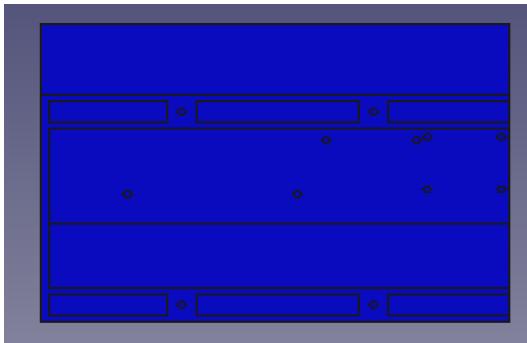


Figura 5.11: Distintas vistas de la carcasa

⁶²<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/parte-superior.FCStd>

⁶³<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/parte-superior.stl>

5.4.4. Sujeción trasera

Para asegurar que la *power bank* se mantenga en su lugar dentro del robot, se diseñó una pieza que se atornilla en el lado izquierdo del chasis. Esta pieza fue definida como un prisma rectangular con más de 30 mm de altura, aproximadamente 5 mm de largo y 3 mm de ancho (Figura 5.12 izquierda). La pieza debe colocarse en posición vertical para evitar que la *power bank* se deslice, y en posición horizontal cuando se desea extraer esta. Existe una versión en FreeCAD⁶⁴ y otra en formato STL⁶⁵. La Figura 5.12 (derecha) muestra cómo quedaría montada la pieza sobre el robot.

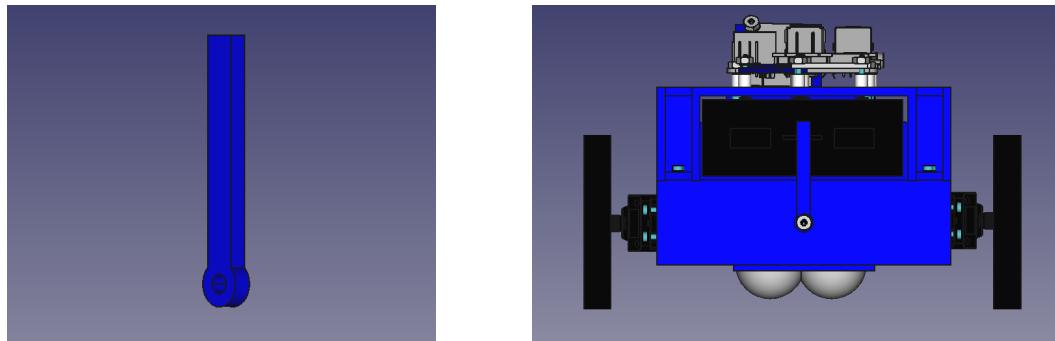


Figura 5.12: Distintas vistas de la pieza para la sujeción trasera

Una vez detalladas cada una de las piezas CAD diseñadas, se continúa describiendo el proceso de impresión y montaje que se ha seguido para conseguir finalmente el prototipo robótico PiBotJ.

5.5. Impresión y montaje

En esta sección se presentan todos los detalles que deben considerarse para replicar este proyecto mediante impresión 3D.

En nuestro caso, para la impresión de PiBotJ, se usó la impresora FDM Creality Ender3 V2 (Figura 5.13), un rollo de PLA convencional azul y Ultimaker Cura⁶⁶ como *software* de impresión. Para la impresión de todas las piezas se emplearon las mismas características que muestra el Cuadro 5.1. Para este proyecto fue necesario imprimir una pieza de cada una de las explicadas en el apartado de Diseño CAD (Sección 5.4), como muestra la Figura 5.14. La duración de impresión fue en torno a 50 horas.

⁶⁴<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/sujeccion-trasera.FCStd>
⁶⁵<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/sujeccion-trasera.stl>
⁶⁶<https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura/>
⁶⁷<https://www.creality.com/es/products/ender-3-v2-neo-3d-printer>

Figura 5.13: Impresora FDM Creality Ender3 V2⁶⁷

Características	Parámetros
Calidad	Altura de capa: 0,2 mm Ancho de línea: 0,4 mm
Paredes	Grosor de pared: 0,8 mm Cantidad de líneas de pared: 2 Alineación de costura en Z: <i>Esquina más afilada</i> Preferencia de costura en esquina: <i>Ocultación inteligente</i>
Relleno	Densidad de relleno: 15 % Patrón de relleno: <i>Gyroid</i>
Velocidad	Velocidad de impresión: 50 mm/s Velocidad de la primera capa: 20 mm/s

Cuadro 5.1: Características usadas para la impresión

Una vez impresas todas las piezas y retirados sus soportes generados, fue el momento del montaje, cuya duración fue de dos horas aproximadamente, pero puede ser más dependiendo de las habilidades del usuario.

Uno de los elementos que se tuvo que tener en cuenta para el montaje fueron los Hama Beads⁶⁸. Los Hama Beads son cilindros de plástico pequeños con un círculo en el centro usados comúnmente para manualidades y para la creación de objetos de decoración. En este caso, se usaron para evitar que tanto la Raspberry Pi como el módulo GPS toquen directamente la superficie impresa. Además, por su círculo interior pasaban perfectamente los tornillos usados.

Otro aspecto a tener en cuenta es que, para la placa del módulo GPS, fue necesario

⁶⁸<https://www.hamabeads.es/>



Figura 5.14: Piezas impresas

soldarle unos pines (Figura 5.15) para posteriormente conectarle los cables sin pérdidas de señal. También fue necesario agrandar con una taladradora los cuatro agujeros que tiene la antena del módulo para que puedan entrar bien los tornillos.



Figura 5.15: Soldando pines al módulo GPS

Una vez solventados los contratiempo anteriores, se puede pasar a la fase de fijación de piezas mediante tornillos. El Cuadro 5.2 muestra toda la tornillería necesaria. Los tornillos, tuercas y arandelas se pueden obtener en cualquier ferretería. Se recomienda usar un fijador para evitar que se aflojen los tornillos.

Se ha creado en FreeCAD⁶⁹, un diseño de PiBotJ completo, que muestra el lugar

⁶⁹<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/design/robotcompleto.FCStd>

donde se sitúa la tornillería del robot y ayudará al usuario facilitar el ensamblaje. La Figura 5.16 muestra el robot completo montado. Para conseguir realizar el diseño de PiBotJ completo en FreeCAD, se tomaron los ficheros .stl obtenidos de la Sección 5.4. Además, se tuvo que diseñar aparte: la antena del módulo GPS, la batería, la rueda loca, un Hama Bead y la rueda; todos los ficheros se pueden encontrar en la carpeta `misc`⁷⁰. La placa del módulo GPS necesitó ser editada partiendo de una versión de Thinkercad⁷¹ y, por otro lado, el resto de componentes se tomaron de la librería de FreeCAD⁷².

Componente	Tornillos	Tuercas	Arandelas	Hama Beads blancas
Motores	12 M2 10mm	12	24	
Picamera (base)	2 M2 10mm	2	4	
Picamera (cámara)	2 M2 12mm	2	12	
Raspberry Pi	4 M2 12mm	4		4
Placa GPS	4 M2 16mm	4	8	4
Antena GPS	4 M2 16mm	4		4
Sujección entre placas	4 M2 16mm	4	8	
Sujección trasera	1 M2 16mm	1	2	

Cuadro 5.2: Tornillería necesaria



Figura 5.16: Robot completo montado en FreeCAD

Para sujetar el cable de alimentación de la Raspberry Pi se utilizó una brida. Para optimizar el espacio ocupado por los cables se emplearon gomas pequeñas. Además,

⁷⁰https://github.com/RoboticsURJC/tfg_jlopez/tree/main/design/misc

⁷¹<https://www.tinkercad.com/things/6etb23HSw0w-gy-neo6mv2-neo-6m>

⁷²<https://github.com/FreeCAD/FreeCAD-library/tree/master>

fue necesario utilizar diez cables macho-hembra para alimentar los dos motores y el módulo GPS, mientras que el motor de la cámara se quedó sin conectar, ya que la cámara se va a mantener fija, dejando su movilidad como una posible línea futura de trabajo.

Respecto a las ruedas, se han probado dos tipos: las del kit *ActivityBot* y las de goma azul genéricas. Según la aplicación, se puede optar por una u otra. A continuación, se explicará el montaje de cada tipo.

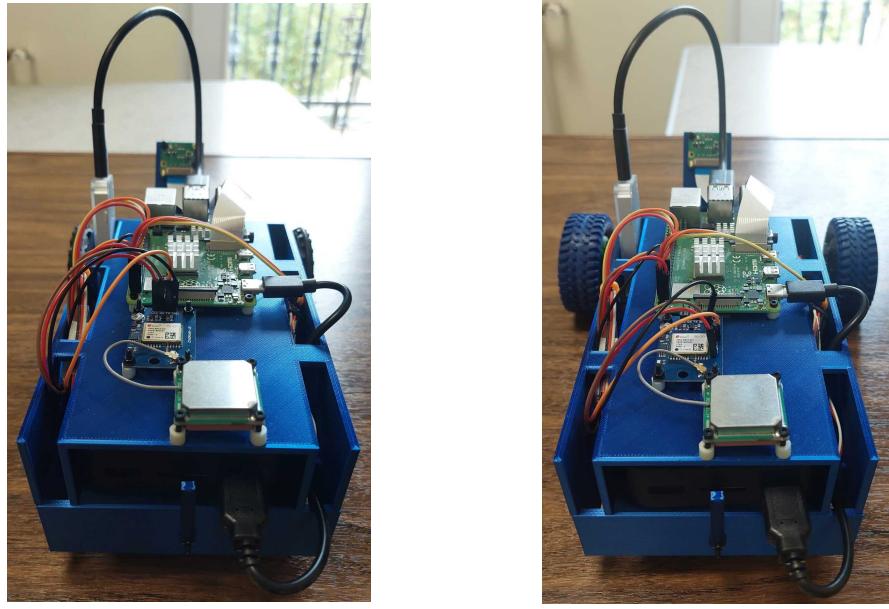
Para utilizar las ruedas del kit *ActivityBot* simplemente fue necesario atornillarlas al robot con el tornillo que viene incluido, ya que estas ruedas fueron diseñadas específicamente para motores Parallax. El aspecto del robot con este tipo de ruedas es el que muestra la Figura 5.18 (izquierda).

Por otro lado, para poder usar la ruedas genéricas, fue necesario realizar algunas modificaciones. En primer lugar, se usó una sierra para cortar las partes sobrantes (Figura 5.17, izquierda). También fue necesario perforar la rueda con un taladro para que el tornillo que conecta al motor encajara fácilmente. Y, tras esto, fue necesario colocar dos topes de motor sobre la superficie lisa de la rueda (Figura 5.17, derecha) y hacer los agujeros correspondientes para atornillarlos. En este caso, se utilizaron siete tornillos M2 de 8 mm. El aspecto del robot con este tipo de ruedas es el que muestra la Figura 5.18 (derecha).



Figura 5.17: Ensamblaje ruedas azules genéricas

En el Capítulo de Experimentos se verá qué rueda funciona mejor según el tipo de superficie. Para resumir lo explicado, el Cuadro 5.3 enumera todos los componentes necesarios para construir a PiBotJ, junto con sus respectivos precios.



Robot con ruedas negras

Robot con ruedas azules

Figura 5.18: Robot con distintos tipos de ruedas

Componente	Precio
Motores Parallax	34€
Picamera	18€
Raspberry Pi	65€
Módulo GPS	9€
Ruedas ActivityBot/Azules	9€
Google Coral USB	65€
Powerbank	20€
Rueda Loca	1,13€
Tornillos, tuercas, arandelas y Hama Beads	3€
Cables, gomas y brida	3€
Rollo de PLA gastado	10€

Cuadro 5.3: Coste proyecto

El coste total del proyecto es de 237,13€, por lo que está por debajo del límite establecido de 250€, cumpliendo de este modo con el objetivo establecido en la Sección 3.1.

Llegados a este punto, se ha completado el diseño y construcción del prototipo robótico PiBotJ. A continuación, se detallará el soporte *software* que se ha dado a este robot para alcanzar el objetivo del proyecto.

Capítulo 6

Soporte software del robot

El software es una gran combinación entre arte e ingeniería

Bill Gates

Una vez contado todo el proceso llevado a cabo para el diseño y construcción del prototipo robótico descrito, en este capítulo se explica la implementación *software* desarrollado para dar soporte a dicho prototipo.

6.1. Simulación

En esta sección se describe el proceso seguido para conseguir poner a PiBotJ en funcionamiento a través de simulación; en concreto, a través del simulador Gazebo. Esta parte ha sido desarrollada en el ordenador principal, explicado en la Sección 4.1.9, apoyándose en el sistema ROS 2 Humble⁷³.

6.1.1. URDF/Xacro

Primero de todo fue necesario definir las estructuras y propiedades del robot. Para ello, se decidió usar el formato *Unified Robot Description Format* (URDF)⁷⁴ y *Xacro*⁷⁵, muy comunes en aplicaciones robóticas. URDF usa un formato de ficheros XML y describe al robot como un conjunto de *links* (enlaces), que están conectadas por una serie de *joints* (articulaciones); mientras que *Xacro* usa también un formato de ficheros XML que permite crear URDF de manera más modular, reutilizable y eficiente

⁷³<https://docs.ros.org/en/humble/Installation.html>

⁷⁴<http://wiki.ros.org/urdf>

⁷⁵<http://wiki.ros.org/xacro>

mediante el uso de macros y propiedades⁷⁶.

En este proyecto se decidió crear una serie de ficheros *Xacro*, cada uno dedicado a las distintas partes del robot (*camera.xacro*⁷⁷, *gps.xacro*⁷⁸ y *robot_core.xacro*⁷⁹). Cada fichero *Xacro* necesita siempre tener la mismas etiquetas de *<joint>* y *<link>*, empleadas según convenga. Es importante usar herramientas como validadores de XML⁸⁰ para evitar problemas.

Existen cuatro tipos de *joint*: *prismatic*, *continuous*, *revolute* y *fixed*. En el Código 6.1 se puede ver la definición de una *fixed joint*; si se quiere usar otro tipo de *joint*, hay que añadir algunos campos⁸¹.

```
<joint name="gps_joint" type="fixed">
  <parent link="chassis"/>
  <child link="gps_frame"/>
  <origin xyz="-0.1 0.0 0.04" rpy="0 0 0"/>
</joint>
```

Código 6.1: Macro que define una *fixed joint*

En relación a los *link*⁸², obligatoriamente tienen que tener las macros de *<visual>*, *<collision>* e *<inertial>*, si no pueden surgir errores⁸³. Existen cuatro tipos de geometría: *box*, *cylinder*, *sphere* y *mesh*.

Una vez definidas las distintas partes del robot, se describen las interacciones del robot con el simulador; para ello se usa la macro *<gazebo>*. En el presente proyecto, se ha simulado el sensor cámara y el módulo GPS. Se pueden encontrar más ejemplos en la web oficial⁸⁴.

Asimismo, se han definido los sistemas de coordenadas que aparecen en la Figura 6.1. Una vez se definió el robot y los sensores necesarios para que Gazebo interactuara con el modelo, se hizo uso de ROS 2 Control.

⁷⁶<https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/ready-for-ros/urdf/>

⁷⁷https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_r2c/description/camera.xacro

⁷⁸https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_r2c/description/gps.xacro

⁷⁹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_r2c/description/robot_core.xacro

⁸⁰<https://www.xmlvalidation.com/index.php?id=1&L=0#xml-9-6--1732781305>

⁸¹<https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/ready-for-ros/urdf/#joint-tags>

⁸²<https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/ready-for-ros/urdf/#link-tags>

⁸³<https://answers.gazebosim.org//question/25166/problem-changing-joint-from-fixed-to-revolute/>

⁸⁴<http://wiki.ros.org/urdf/XML/Gazebo>



Figura 6.1: Sistemas de Coordenadas de PiBotJ

6.1.2. ROS 2 Control

Como se explicó en la Sección 4.2.5, ROS 2 Control es un *framework* que permite gestionar y controlar los sensores y actuadores de manera eficiente, y es por ello que se decidió aplicar a este proyecto a través del fichero `ros2_control.xacro`⁸⁵.

Para este proyecto se definió un sistema llamado *GazeboSystem*, encargado del *hardware interface*; de esta forma, es más sencillo añadir el número de sensores y actuadores que se necesiten. En muchos casos, se decidió controlar a `left_wheel_joint`, `right_wheel_joint` y a `camera_joint`, que son aquellos *joints* que tenían asignados un motor en la vida real.

Al ejecutar `ros2 control list.hardware_interfaces` se puede ver las interfaces asociadas de lectura/escritura y de monitorización que tiene cada *joint* a controlar. En la Figura 6.2 se pueden ver las interfaces que tiene PiBotJ y, por ende, cómo se va a controlar cada interfaz.

Tras definir los *joints* a controlar, era necesario definir en un fichero YAML el tipo de controladores que utilizaba el *controller manager*. Dentro de cada controlador había que asignar los *joints* definidos previamente al controlador que necesite cada una. En este caso, se asignaron las ruedas a un control diferencial y, la cámara, se decidió

⁸⁵https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_r2c/description/ros2_control.xacro

```
juloau@juloau-VivoBook:~/Desktop/TFG/tfg-jlopez/code/ros2$ ros2 control list_hardware_interfaces
command interfaces
    camera_joint/position [available] [claimed]
    left_wheel_joint/velocity [available] [claimed]
    right_wheel_joint/velocity [available] [claimed]
state interfaces
    camera_joint/position
    left_wheel_joint/position
    left_wheel_joint/velocity
    right_wheel_joint/position
    right_wheel_joint/velocity
```

Figura 6.2: Interfaces que tiene definidas PiBotJ

controlar por posición, usando el *topic* \pos_cont⁸⁶.

Una vez el robot estaba completamente definido en los diferentes ficheros *Xacro*, era necesario unirlos todos en otro fichero llamado `robot.urdf.xacro`⁸⁷ para poder facilitar la publicación del estado del robot, y eso se consigue usando `robot_state_publisher`.

6.1.3. Robot State Publisher

En la Web oficial de ROS⁸⁸ se explica que `robot_state_publisher` es esencial para publicar las transformaciones (tf) entre los diferentes *links* del robot y para proporcionar información sobre el estado de sus *joints* a cualquier componente en el sistema. Aunque pueda parecer complicado, la Figura 6.3, obtenida de la web de Articulated Robotics⁸⁹, resume muy bien los pasos que sigue `robot_state_publisher`.

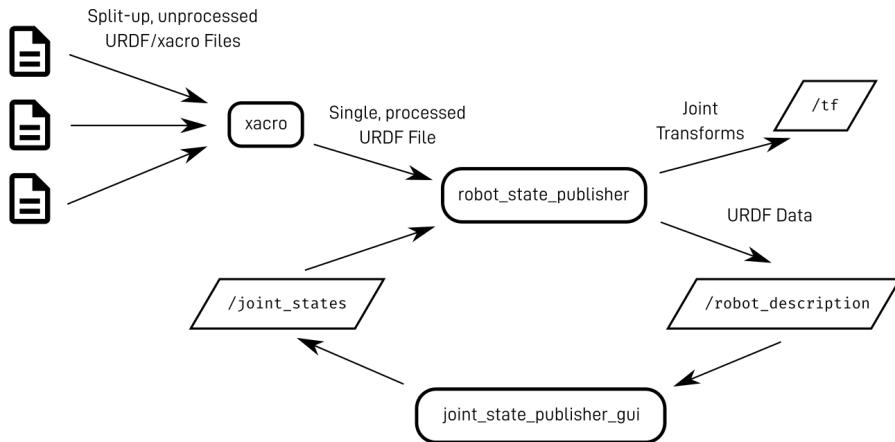


Figura 6.3: Diagrama de robot_state_publisher

⁸⁶<https://control.ros.org/humble/index.html>

⁸⁷https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_r2c/description/robot.urdf.xacro

⁸⁸http://wiki.ros.org/robot_state_publisher

⁸⁹<https://articulatedrobotics.xyz/tutorials/mobile-robot/concept-design/concept-urdf#quick-recap>

Una vez todos los elementos a utilizar estaban listos, era el momento de aglutarinlos todos y crear un launcher que los inicializara y los pusiera en ejecución.

6.1.4. Launcher

El *launcher* que se decidió crear para este proyecto parte del creado por Johnewans⁹⁰, creador de Articulated Robotics, y fue modificado según las necesidades, siendo finalmente el resultante `launch_sim.launch.py`⁹¹. Para facilitar su entendimiento, la Figura 6.4 explica los componentes que forman parte del *launcher*. Con esto, ya podemos ejecutar al completo el PiBotJ.

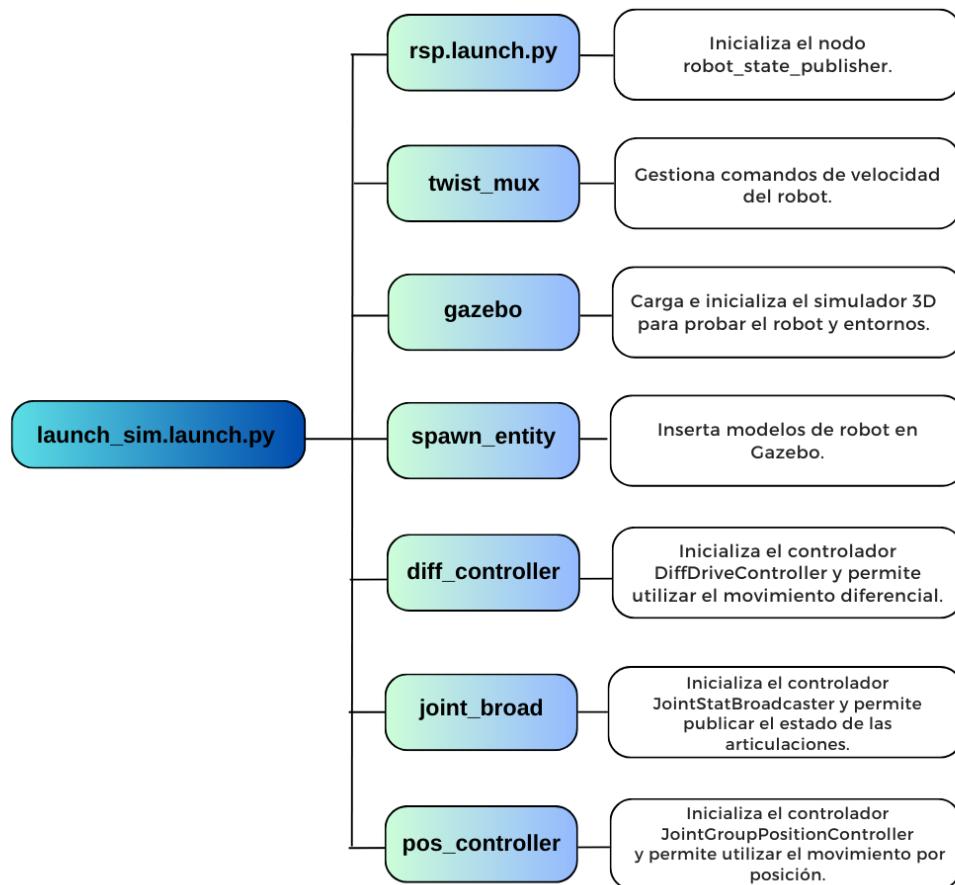


Figura 6.4: Esquema de `launch_sim.launch.py`

⁹⁰https://github.com/joshnewans/articubot_one/blob/main/launch/launch_sim.launch.py
⁹¹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_r2c/launch/launch_sim.launch.py

6.1.5. Ejecución en simulador

La Figura 6.5 muestra todos los *topics* que forman parte del robot y para conseguir el objetivo propuesto en la Sección 3.1, es necesario utilizar únicamente: */camera/image_raw*, para ver la imagen de la cámara; */cmd_vel*, para mover las ruedas; */gps/data*, para ver los valores de posición del GPS; y */pos_cont/commands*, para mover el motor de la cámara.

```
julioau@julioau-VivoBook:~/Desktop/TFG/tfg-jlopez/code/ros2$ ros2 topic list
/camera/camera_info
/camera/image_raw
/clock
/cmd_vel
/diagnostics
/diff_cont/cmd_vel_unstamped
/diff_cont/odom
/diff_cont/transition_event
/dynamic_joint_states
/gps/data
/gps/gps_controller/vel
/joint_broad/transition_event
/joint_states
/parameter_events
/performance_metrics
/pos_cont/commands
/pos_cont/transition_event
/robot_description
/rosout
/tf
/tf_static
```

Figura 6.5: Topics disponibles al lanzar el robot

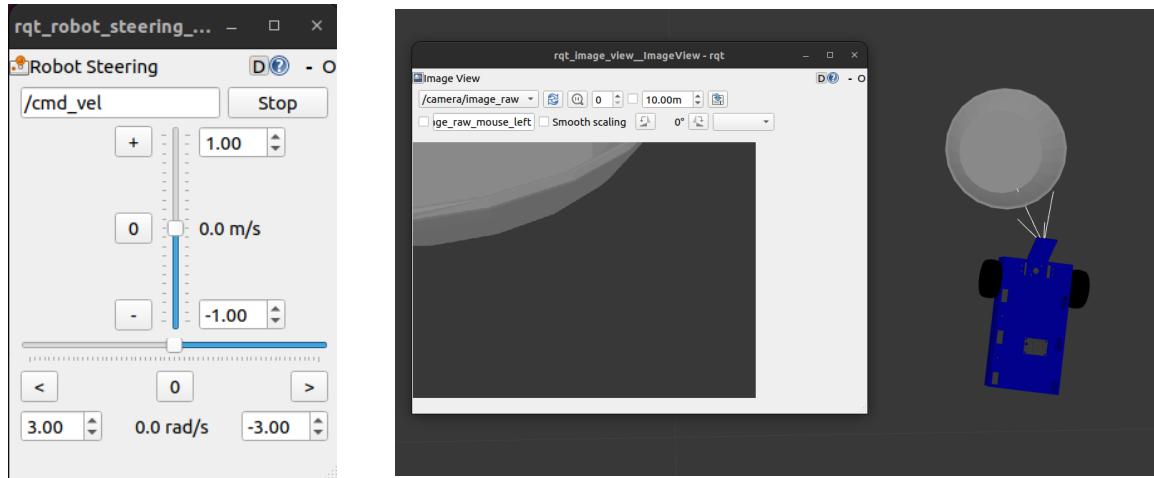
Para mover las ruedas hay muchas formas de hacerlo, pero en este caso se usó *rqt_robot_steering*, como muestra la Figura 6.6 (izquierda). Si se quiere visualizar la cámara, se puede usar *rviz2* o *ros2 run rqt_image_view rqt_image_view*, que fue el comando usado para probar su funcionamiento (Figura 6.6 derecha). Por otro lado, los datos vertidos por el módulo GPS se pueden visualizar usando *ros2 topic echo /gps/data*, como muestra la Figura 6.7 y finalmente, para mover el motor de la cámara por posición, es necesario usar el comando siguiente:

```
ros2 topic pub /pos_cont/commands std_msgs/msg/Float64MultiArray \
"data: [-0.5]"
```

Siendo los valores que van dentro de *data* desde 3 (giro hacia la izquierda) hasta -3 (giro hacia la derecha).

El resultado final, con el robot de PiBotJ funcionando en simulación, se puede apreciar en la secuencia mostrada en la Figura 6.8, pudiéndose ver la ejecución completa en el vídeo⁹².

⁹²<https://www.youtube.com/watch?v=A0yi7Y1Lpq0>



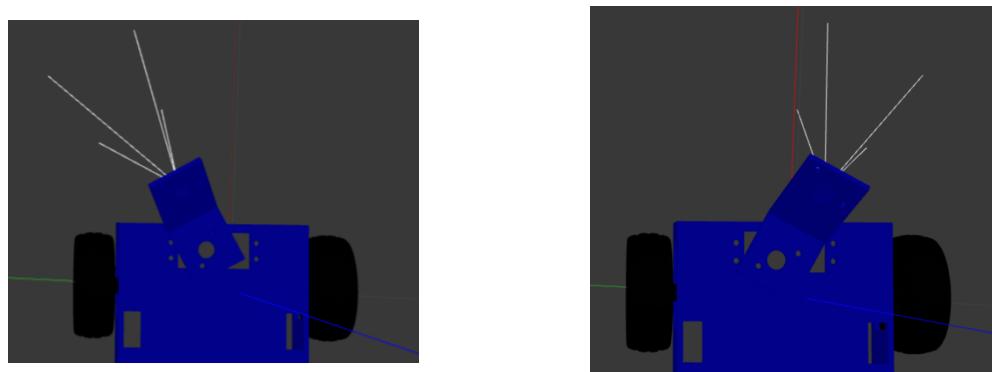
Mover las ruedas

Visualizar la cámara

Figura 6.6: Herramientas usadas

```
juloa@juloa-VivoBook:~/Desktop/TFG/tfg-jlopez/code/ros2$ ros2 topic echo /gps/data
header:
  stamp:
    sec: 2757
    nanosec: 444000000
  frame_id: gps_frame
status:
  status: 0
  service: 1
latitude: -5.2929458126972635e-06
longitude: 1.0408556761408664e-05
altitude: 0.04928559251129627
position_covariance:
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
- 0.0
position_covariance_type: 2
--
```

Figura 6.7: Herramienta usada para visualizar los valores del GPS



Rotación hacia la izquierda

Rotación hacia la derecha

Figura 6.8: Herramienta usada para rotar la cámara

6.2. Componentes del robot real

Una vez definido el robot a través de sus topics, ya se puede lanzar su ejecución (usando la RPi 4 como núcleo computacional) para realizar su tarea.

El sistema operativo instalado en la placa controladora fue Ubuntu 20.04 Server LTS y la distribución Foxy de ROS2, como se explicó en la Sección 4.2.1 y 4.2.5 respectivamente. Se hizo uso de SSH a efectos de usar el PC principal como cliente. Para ello, se instaló el paquete de openssh-client.

Es importante recordar que, al usar ROS 2, todos los nodos que estén ejecutándose dentro de una red Wifi, serán visibles para cualquier dispositivo que esté conectado dentro de esa red Wifi. Gracias a eso, se facilitó la depuración y monitorización de cada sensor y actuador de PiBotJ.

En los siguientes apartados se detalla cómo cada dispositivo que conforma el PiBotJ está en funcionamiento. Para conocer todos los pasos seguidos para poder configurar cada componente, se puede ver en el Anexo.

6.2.1. Cámara

Partiendo del `cameraPublisher.py` de este tutorial⁹³, se pudo crear un nodo llamado `camera_node`⁹⁴ que permitía leer y publicar la imagen del dispositivo de la cámara. También se puede monitorizar usando las mismas herramientas que en la Sección 6.1.5 para controlar la cámara en simulación (Figura 6.9).

Para conformar un modelo teórico de la cámara se necesitan conocer sus parámetros intrínsecos y extrínsecos.

Parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos definen la geometría interna y la óptica de la cámara. Estos determinan cómo la cámara proyecta los puntos del mundo 3D al plano de la imagen en 2D, siendo constantes mientras no varíen las características y posiciones relativas entre la óptica y el sensor imagen. Estos parámetros los provee el fabricante de la cámara, aunque se pueden obtener mediante un proceso de calibración.

Para los cálculos teóricos se decidió consultar en numerosas fuentes de información

⁹³https://www.youtube.com/watch?v=6e94ZnYn0_U

⁹⁴https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/camera.py



Figura 6.9: Cámara de PiBotJ en funcionamiento

y gracias a la Web *Elinux*⁹⁵, se pudieron obtener, sus parámetros técnicos. Asimismo, siguiendo el libro [Hartley and Zisserman, 2004] se consiguieron las fórmulas correspondientes a la distancia focal (Ecuación 6.1) y al centro de la imagen (Ecuación 6.2).

$$f_x = F \cdot \frac{\text{Res. horizontal}}{\text{tam. sensor horizontal}} \quad f_x = 3,04 \cdot \frac{640}{3,674} = 529,56$$

$$f_y = F \cdot \frac{\text{Res. vertical}}{\text{tam. sensor vertical}} \quad f_y = 3,04 \cdot \frac{480}{2,760} = 528,69$$

Ecuación 6.1: Fórmula para calcular la distancia focal teórica

$$c_x = \frac{\text{Res. horizontal}}{2} \quad c_x = \frac{640}{2} = 320$$

$$c_y = \frac{\text{Res. vertical}}{2} \quad c_y = \frac{480}{2} = 240$$

Ecuación 6.2: Fórmula para calcular el centro de la imagen

Para los cálculos prácticos ha sido necesario seguir los pasos de calibración creando los ficheros `calibration.py`⁹⁶ y `process.py`⁹⁷ siguiendo el tutorial⁹⁸. El

⁹⁵https://elinux.org/Rpi_Camera_Module#Technical_Parameters_.28v.2_board.29

⁹⁶<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/camera/calibration/calibration.py>

⁹⁷<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/camera/calibration/process.py>

⁹⁸<https://www.youtube.com/watch?v=XFBKwme5HYk>

fichero `calibration.py` captura las imágenes con un patrón de ajedrez, y el fichero `process.py` genera la matriz de parámetros intrínsecos y de distorsión. El proceso se repitió diez veces, siendo la matriz resultante la obtenida como media de las diez matrices. Sus valores son: $f_x = 497,66$, $f_y = 502,16$, $c_x = 325,3$ y $c_y = 240,18$ (Figura 6.10)

```
pi@raspberrypi:~/Desktop/tfg-jlopez/code/camera/calibration/valid_tests/cal_matrix$ python3 meanintrinsic
matrix.py
[[497.6612503890001, 0.0, 325.295473259], [0.0, 502.156098021, 240.18401386500005], [0.0, 0.0, 1.0]]
pi@raspberrypi:~/Desktop/tfg-jlopez/code/camera/calibration/valid_tests/cal_matrix$ cd
```

Figura 6.10: Media de la matriz de intrínsecos

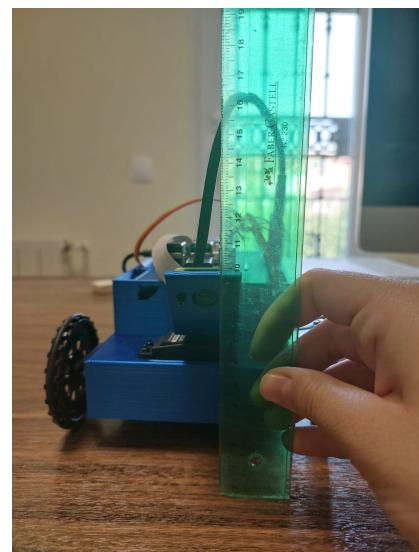
Podemos ver que los valores de fábrica difieren de los obtenidos empíricamente. Esto es debido a que cada cámara tiene sus pequeñas diferencias, propias del proceso de calibración.

Parámetros extrínsecos

Los parámetros extrínsecos relacionan los sistemas de referencia del mundo real y la cámara, describiendo la posición y orientación de la cámara en el sistema de coordenadas del mundo real. Dichos parámetros incluyen la rotación y la traslación de la cámara. En este caso, la cámara tiene una rotación sobre el eje Y de 50° (Figura 6.11 izquierda) y está trasladada 8,8 cm en el eje Z (Figura 6.11 derecha).



Rotación de la cámara



Traslación de la cámara

Figura 6.11: Parámetros extrínsecos

6.2.2. Google Coral USB

Como se comentó en la Sección 4.1.6, existen severas limitaciones al tratar de acelerar tareas en dispositivos que no cuentan con hardware específico para ello. Por ello, se decidió incluir el dispositivo USB Google Coral y se puede demostrar que está en funcionamiento si la luz que tiene el dispositivo parpadea.

6.2.3. Módulo GPS

El módulo GPS utiliza una comunicación UART, o comunicación serial, mediante puerto de transmisión TX y puerto de recepción RX. En nuestro caso, se utilizan los pines tratados en la Sección 5.2.

El serial se encuentra configurado correctamente en `/dev/ttyAMA0` gracias a los pasos de instalación descritos en el Anexo, como muestra la Figura 4.11. Para tratar la información obtenida, se decidió usar la librería llamada PyNMEA2, detallada en la Sección 4.2.3, y que se desarrolló con el código del nodo `gps_node`⁹⁹ para parsear la información y únicamente publicar la latitud y longitud, como muestra la Figura 6.12. De los valores obtenidos, se decidió usar un conversor de coordenadas¹⁰⁰ para demostrar que los valores recibidos eran correctos, como muestra la Figura 6.13.

```
^Cjuloeu@juloeu-VivoBook: $ ros2 topic echo /gps_data
data: 'Lat: 40.10288416666667, Lon: -4.0471075'
...
data: 'Lat: 40.10288416666667, Lon: -4.0471075'
...
data: 'Lat: 40.10288416666667, Lon: -4.0471075'
...
data: 'Lat: 40.10288383333334, Lon: -4.0471078333333335'
...
data: 'Lat: 40.10288383333334, Lon: -4.0471078333333335'
...
data: 'Lat: 40.10288383333334, Lon: -4.0471078333333335'
...
data: 'Lat: 40.10288366666666, Lon: -4.047108'
...
data: 'Lat: 40.10288366666666, Lon: -4.047108'
```

Figura 6.12: Valores publicados de latitud y longitud captados del GPS

Debido a la distribución de Ubuntu usada, hay problemas al encender la Raspberry Pi si tiene algo a través del puerto serie¹⁰¹, pero las sugerencias de otros usuarios no conseguían hacer funcionar bien el módulo; por lo tanto, la única solución encontrada fue desconectar el módulo GPS hasta que se inicia sesión a través de ssh y luego

⁹⁹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/gps_node.py

¹⁰⁰<https://www.coordenadas-gps.com/convertidor-de-coordenadas-gps>

¹⁰¹https://wiki.ubuntu.com/EoanErmione/ReleaseNotes#Raspberry_Pi



Figura 6.13: Demostración de una correcta localización

conectar el módulo.

El módulo GPS realmente capta información válida cuando se enciende el LED que tiene integrado. Una forma fiable para que el módulo reciba todo el rato señal correcta es dejarle en el exterior hasta que se encienda el LED y luego poder operar con el módulo en interior o exterior.

6.2.4. Servomotores

Los últimos componentes que faltaban por configurar son los motores, que van conectados a los pines GPIO

Tras seguir los pasos de configuración del Anexo, importando la librería `RPi.GPIO` se pueden operar directamente. Estos servomotores se mueven por posición entre 0° y 180° , y se controlan mediante modulación del ancho del pulso (PWM), donde la posición del eje del servo depende de la duración del pulso. Para mantener su posición, el servo necesita recibir un pulso cada 20 ms ¹⁰² (Figura 6.14). Para cambiar ese PWM¹⁰³ es necesario usar el procedimiento `ChangeDutyCycle()`, que modifica el porcentaje de tiempo que la señal está activa durante un período de la señal. En este caso, el ciclo de trabajo determina la posición del eje del servo siendo 0° de 2,5% de *duty cycle* y 180° de 12,5% *duty cycle*. Para facilitar la lógica de movimiento se creó una fórmula de conversión de grados a porcentaje de trabajo. En la Figura 6.15 se muestran los

¹⁰²<https://docs.rs-online.com/0e85/0900766b8123f8d7.pdf>

¹⁰³<https://solectroshop.com/es/blog/que-es-pwm-y-como-usarlo--n38>

distintos valores necesarios para hacer los movimientos que necesitaba PiBotJ: hacia adelante, hacia atrás, girar hacia la izquierda mientras avanza hacia adelante, y girar hacia la derecha mientras avanza hacia adelante.

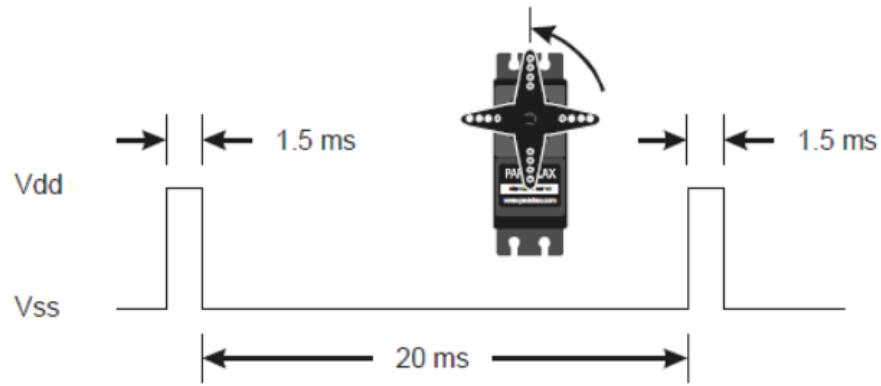


Figura 6.14: Diagrama para la posición central del servo

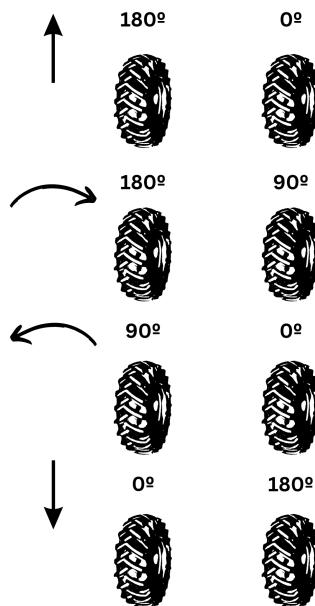


Figura 6.15: Distintas direcciones de PiBotJ

Una vez configurados todos los componentes del robot, ya se puede pasar a desarrollar el *software* que conforma el comportamiento final de este.

6.3. Comportamiento del robot real

PiBotJ ya estaba listo para poder recibir la inteligencia que necesitaba para conseguir el objetivo principal descrito en la Sección 3.1. A diferencia de la Sección 6.1.2 que empleaba ROS 2 control, en este caso al estar todo configurado a bajo nivel, se decidió usar una arquitectura de nodos con *topics* publicadores y suscriptores.

6.3.1. Red neuronal para la detección de baches

Para conseguir la detección, se procedió al entrenamiento de un modelo de aprendizaje supervisado que detectaba baches. Se decidió usar YOLOv8, el cual hace uso de una única red neuronal convolucional para detectar objetos en imágenes en tiempo real y con facilidad de exportación a diferentes dispositivos.

Para poder entrenar dicho modelo, fue necesario usar un *dataset* tomado de [moinfaisal, 2023] que estaba formado por 202 imágenes ya segmentadas. El entrenamiento duró alrededor de una hora y con una duración de 120 *epochs*. Una vez pasada esa hora, se pudo obtener el modelo entrenado en formato .pt y todos los resultados del entrenamiento aparecen mostrados en la Figura 6.16 y 6.17.

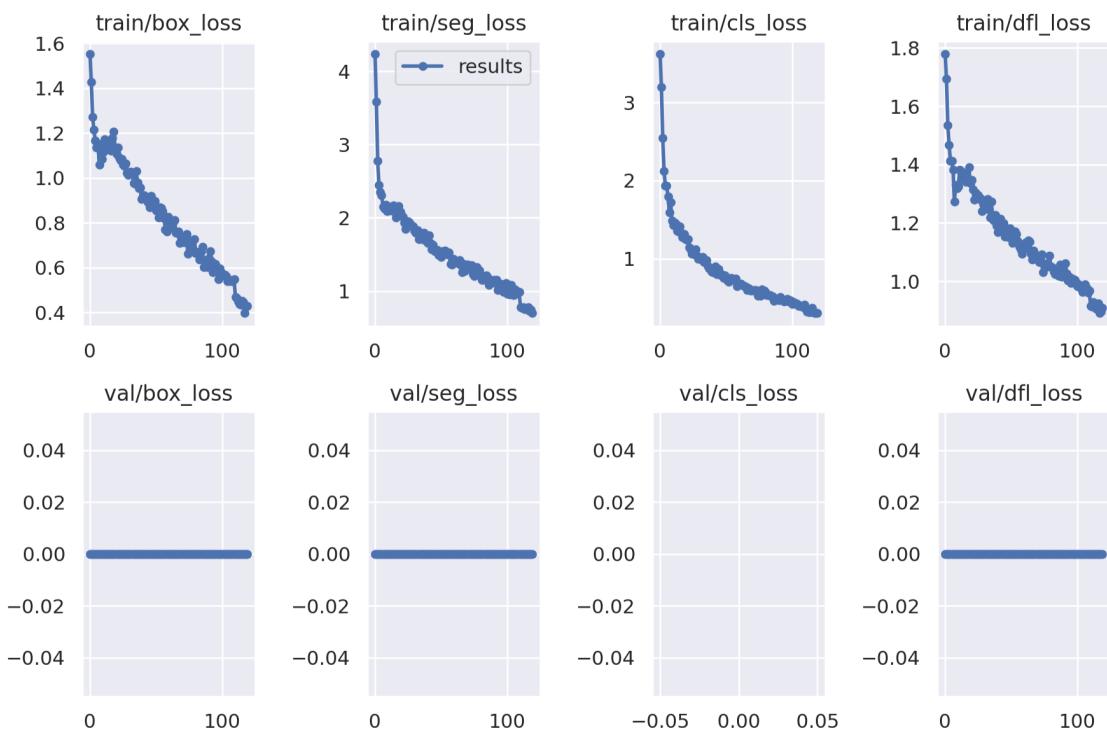


Figura 6.16: Gráficas de resultados del entrenamiento



Figura 6.17: Gráficas de resultados del entrenamiento: métricas

En la Figura 6.16 se puede ver que aparecen cuatro gráficas en la parte superior midiendo el error obtenido durante el entrenamiento del modelo y se puede apreciar que disminuye a medida que pasa el tiempo y por lo tanto, se puede decir que existe un correcto entrenamiento. Por otro lado, las cuatro imágenes que aparecen debajo se tratan de las pérdidas calculadas en el conjunto de validación. Si las pérdidas en validación aumentan mientras las pérdidas de entrenamiento disminuyen, puede ser una señal de *overfitting* (sobreajuste), en este caso al solo usar una imagen de validación el valor permanece constante sobre el 0.

En la Figura 6.17, en concreto en la parte superior, se puede ver las métricas de precisión y exhaustividad (*recall*) que evalúan la capacidad del modelo para identificar correctamente las instancias de cada clase ya que valores son crecientes. En la parte inferior, la métrica *Mean Average Precision* (mAP) es creciente e indica que el modelo está mejorando en la detección y clasificación ya que, evalúa el equilibrio entre precisión y exhaustividad.

Para comprobar que el modelo funciona correctamente, se ha aplicado sobre una serie de imágenes mostradas en la Figura 6.18 y sobre un video¹⁰⁴. Todo está

¹⁰⁴<https://www.youtube.com/watch?v=Gnwciv4pWf0>

documentado en un Jupyter notebook¹⁰⁵ basado en el tutorial de Muhammad Moin¹⁰⁶.

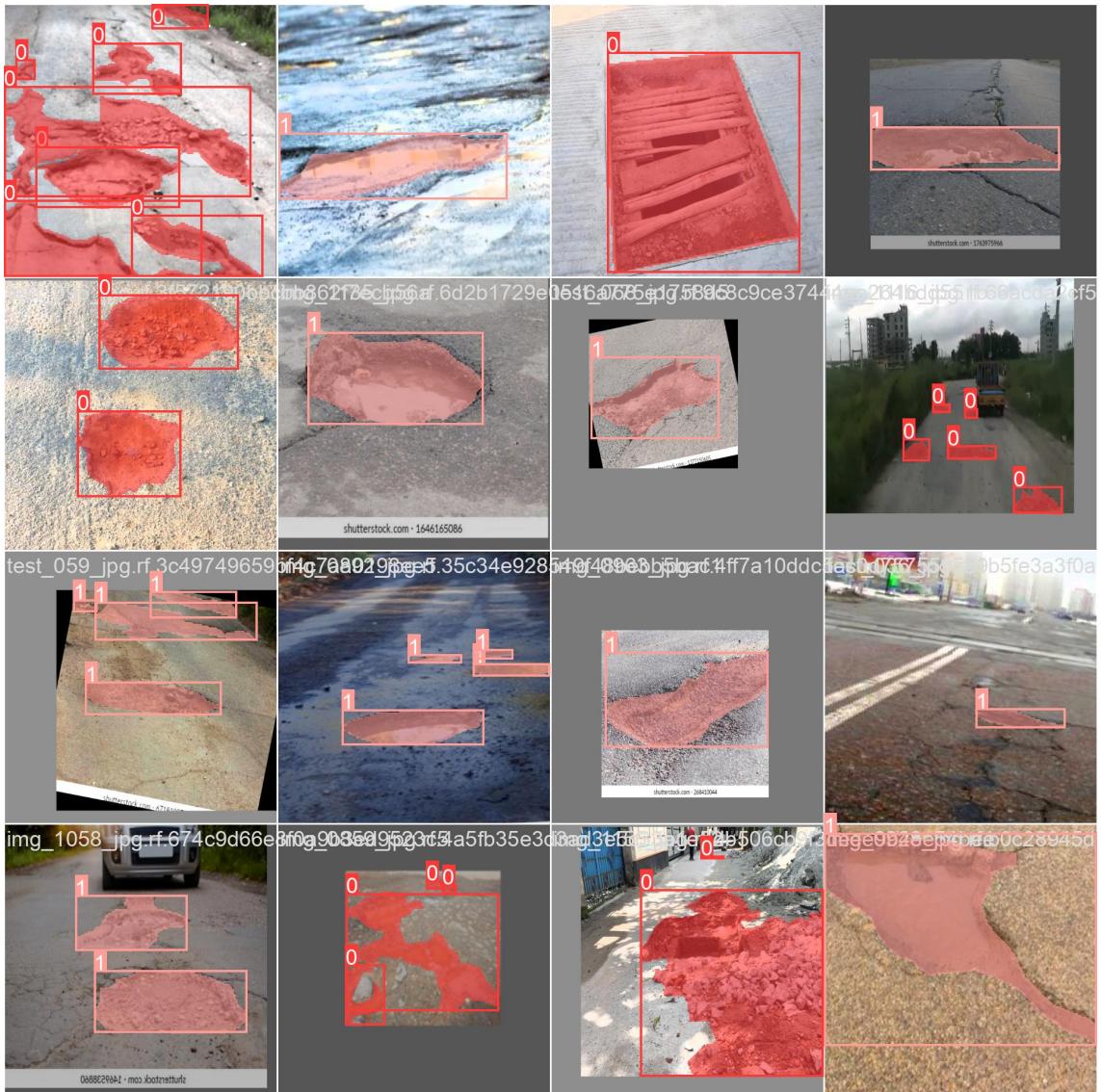


Figura 6.18: Demostración del modelo funcionando

Una vez demostrado que el modelo es capaz de detectar bien los baches, es el momento de convertir ese modelo para que fuera capaz de trabajar dentro de la RPi 4 y Google Coral. Gracias a este video¹⁰⁷, se pudo conseguir realizar este Jupyter notebook¹⁰⁸ que convierte el modelo entrenado a un formato edgetpu de 192x192 imágenes, para que el dispositivo Google Coral pueda operar con él, llamado *bestv2_-*

¹⁰⁵<https://colab.research.google.com/drive/1QRFWn5tQNXs6ldnomCZNv3DUDi8FudW2?usp=sharing>
¹⁰⁶<https://www.youtube.com/watch?v=bA10bHUIErM>
¹⁰⁷<https://www.youtube.com/watch?v=w4yHORvDBw0>
¹⁰⁸<https://colab.research.google.com/drive/1XU20NX5Mq2zNWlZu3hmNIylqbto5hGfm?usp=sharing>

*full_integer_quant_edgetpu.tflite*¹⁰⁹.

Valores obtenidos del modelo

Del presente modelo se pueden obtener los detalles de entrada y de salida del modelo, una vez se ha cargado. De entrada podemos encontrar los siguientes valores:

```
[{'name': 'serving_default_images:0', 'index': 0, 'shape':
array([ 1, 192, 192,    3], dtype=int32), 'shape_signature':
array([ 1, 192, 192,    3], dtype=int32), 'dtype': <class 'numpy.int8'>,
'quantization': (0.01865844801068306, -14), 'quantization_parameters':
{'scales': array([0.01865845], dtype=float32),
'zero_points': array([-14], dtype=int32), 'quantized_dimension': 0},
'sparsity_parameters': {}}]
```

Este tensor define la entrada para un modelo cuantizado que toma imágenes RGB de tamaño 192x192, en formato entero de 8 bits (int8). La cuantización utiliza una escala de 0.0187 y un punto cero de -14, mapeando los valores al rango del tensor int8, lo que ayuda a mejorar la eficiencia del modelo. Por otro lado, de salida podemos encontrar los siguientes valores:

```
[{'name': 'PartitionedCall:0', 'index': 2, 'shape':
array([ 1,   38, 756], dtype=int32), 'shape_signature':
array([ 1,   38, 756], dtype=int32), 'dtype': <class 'numpy.int8'>,
'quantization': (0.017339961603283882, 12), 'quantization_parameters':
{'scales': array([0.01733996], dtype=float32),
'zero_points': array([12], dtype=int32), 'quantized_dimension': 0},
'sparsity_parameters': {}},
{'name': 'PartitionedCall:1', 'index': 1, 'shape':
array([ 1,   48, 48,   32], dtype=int32), 'shape_signature':
array([ 1,   48, 48,   32], dtype=int32), 'dtype': <class 'numpy.int8'>,
'quantization': (0.020256992429494858, -114), 'quantization_parameters':
{'scales': array([0.02025699], dtype=float32),
'zero_points': array([-114], dtype=int32), 'quantized_dimension': 0},
'sparsity_parameters': {}}]
```

¹⁰⁹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/bestv2_full_integer_quant_edgetpu.tflite

Estos son dos tensores de salida en un modelo cuantizado. El primer tensor (PartitionedCall:0) tiene forma [1, 38, 756], y el segundo tensor (PartitionedCall:1) tiene forma [1, 48, 48, 32]. Ambos utilizan el formato int8 y aplican parámetros de cuantización específicos que ajustan el rango de valores, optimizando el modelo para dispositivos de bajo consumo. De ambos tensores el que nos interesa es el segundo y es debido a su forma. Posee 32 canales y para este proyecto únicamente nos interesan los canales 0 y 1 como muestra la Figura 6.18.

Aplicación del modelo

Una vez se conocen las características que posee el modelo, es necesario extraer la información y convertirla en el formato adecuado para poder operar con ella (Código 6.2)

Los valores de `pothole_mask_class0` y `pothole_mask_class1` ya se pueden tratar y establecer una umbralización de 0.6 para considerar dichos valores si han detectado bache o no. Sin embargo, los valores de `pothole_mask_class0` y `pothole_mask_class1` eran muy inestables y se consideró la técnica de *Media Móvil Exponencial* (EMA) (Ecuación 6.3) para que no fluctuasen tanto los valores y darle más peso a las medidas más recientes. Esta técnica es común en análisis técnico, como se describe en [Hansun, 2013], pero se decidió incluir en ese proyecto ya que satisfacía las necesidades buscadas y por su liviana carga computacional.

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}$$

Ecuación 6.3: Fórmula de la media móvil exponencial

Siendo α el valor de grado de disminución de ponderación, Y_t el valor actual en tiempo t, S_t es el valor de EMA en tiempo t y S_{t-1} es el valor de EMA en tiempo t-1.

Obtención del contorno y coordenadas

Después de saber si en una imagen había bache o no, se consideraría bache si la detección ocurre durante 3 segundos sin interrupciones. Una vez pasado ese tiempo, había que publicar los píxeles asociados a ese contorno.

Para conseguir los píxeles, se toma la máscara binarizada usando el umbral definido previamente de 0.6. De esa forma, es posible encontrar los píxeles del contorno más grande de la máscara pero, esos píxeles están en base a las dimensiones de la máscara que es de 48x48 píxeles; así que, es necesario aplicar un factor de escala para que los

```

# Redimensionar la imagen a las dimensiones requeridas por el modelo
input_shape = self.input_details[0]['shape']
height, width = input_shape[1], input_shape[2]
resized_frame = cv2.resize(frame, (width, height))

# Convertir la imagen a formato adecuado
input_data = np.expand_dims(resized_frame, axis=0).astype(np.float32)
# Normalizacion
input_data = (input_data - 127.5) / 127.5

# Convertir la imagen a int8
scale, zero_point = self.input_details[0]['quantization']
input_data = (input_data / scale + zero_point).astype(np.int8)

# Establecer el tensor de entrada y realizar la inferencia
self.interpreter.set_tensor(self.input_details[0]['index'], input_data)
self.interpreter.invoke()

# Saca informacion del tensor de salida 2 que tiene forma [1, 48, 48,
# 32]
output_data1 =
    self.interpreter.get_tensor(self.output_details[1]['index'])
# elimina la dimensipn del batch (el primer valor del array)
prediction1 = np.squeeze(output_data1)

# Descuantificar la mascara de baches mirando el canal 0
pothole_mask_class0 = (prediction1[:, :, 0].astype(np.float32) -
    zero_point) * scale
# Descuantificar la mascara de baches mirando el canal 1
pothole_mask_class1 = (prediction1[:, :, 1].astype(np.float32) -
    zero_point) * scale

```

Código 6.2: Cómo convertir los datos del modelo a un formato adecuado

píxeles estén en base a la imagen que es de 192x192 píxeles. Se puede ver un resultado final del contorno detectado en la Figura 6.19.

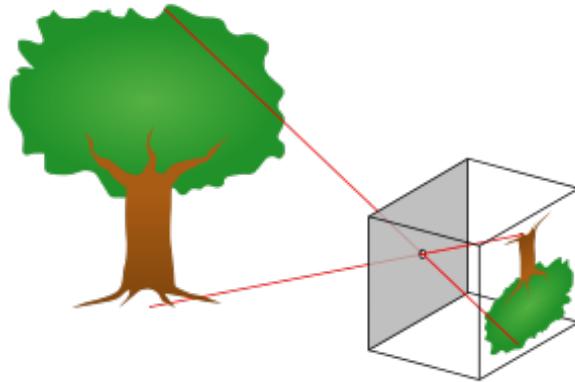
6.3.2. Modelo de cámara pinhole

Extraer información de la cámara no es fácil y por ello se decidió simplificar la cámara definiéndola como una cámara *pinhole*, o también conocida como una cámara estenopeica. El modelo *pinhole* describe una cámara (sin lente) y con una pequeña apertura. Los rayos de luz atraviesan la apertura y proyectan una versión invertida de lo que se capta en el fondo de la cámara (o el plano de la imagen) (Figura 6.20).

¹²⁴https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_estenopeica



Figura 6.19: Contorno del baches detectados

Figura 6.20: Funcionamiento de una cámara esteneopeica ¹²⁴

Este modelo explica cómo se realiza la proyección de un punto en el espacio tridimensional hacia el plano bidimensional de una imagen. En otras palabras, el modelo de cámara define una fórmula matemática que, a partir de las coordenadas de un punto en el espacio 3D, con referencia a la cámara, permite calcular las coordenadas en las que ese punto aparecería en una fotografía. Un resumen de fórmulas matemáticas aparecen en la Figura 6.21.

En la Figura 6.21 se pueden ver los pámetros intrínsecos y extrínsecos que son tomados de la calibración de la cámara, descritos en la Sección 6.2.1. Dicha calibración se realizó sobre imágenes de 640x480 y los píxeles del contorno del bache está en base de imágenes de 192x192, por lo que era necesario aplicar otro factor de conversión.

Una vez se conoce cómo funciona el modelo pinhole, es importante destacar que para poder convertir los píxeles del mundo 2D al mundo real, hay que tener en cuenta

$$\begin{matrix} \text{Factor de escala para homogeneizar } u \text{ y } v \\ \text{Coordenadas del punto proyectivo en pixeles} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Distancia focal x} \\ \text{Distancia focal y} \\ \text{Ángulo de giro} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Centro imagen x} \\ \text{Centro imagen y} \end{matrix} \quad \begin{matrix} \text{Coordinada de un punto 3D en el mundo real} \end{matrix}$$

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & [s] & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Parámetros intrínsecos

Parámetros extrínsecos

↑
Matrices de rotación y traslación

Figura 6.21: Relación de fórmulas del modelo pinhole

que hay tres sistemas de coordenadas diferentes como muestra la Figura 6.22 que ha sido modificada del artículo [Ortiz et al., 2017] y que el modelo pinhole únicamente es capaz de convertir del sistema de coordenadas del mundo real al sistema de coordenadas de la cámara, algo a tener en cuenta.

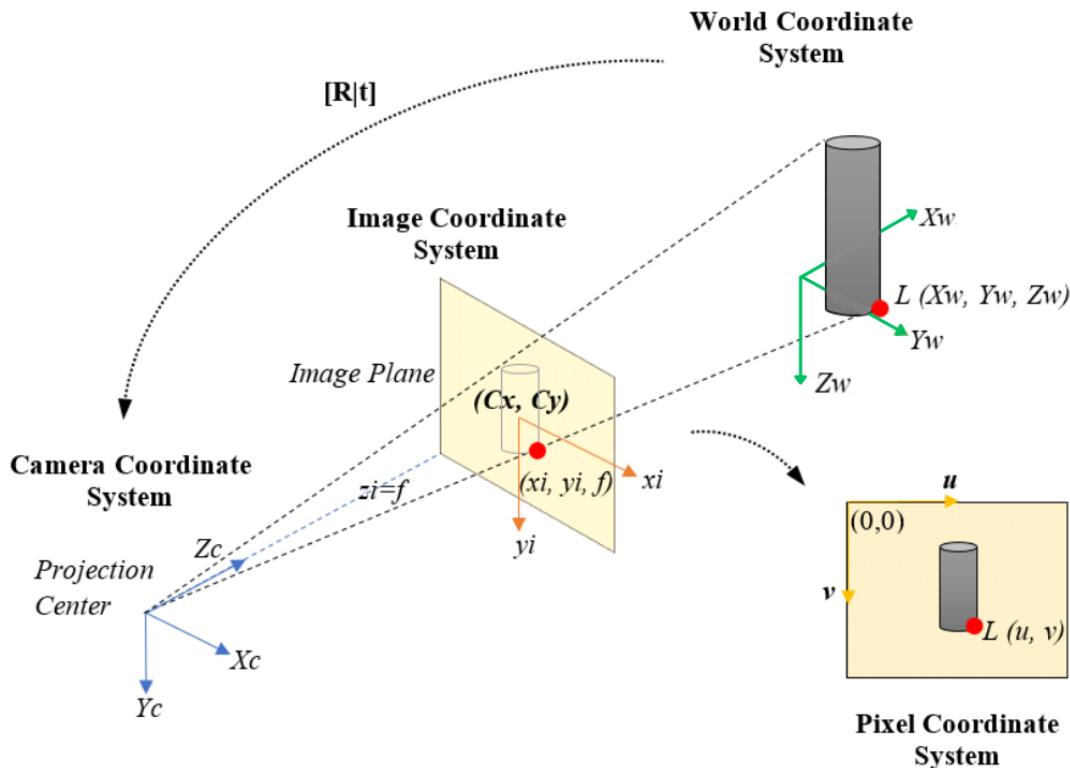


Figura 6.22: Sistemas de coordenadas

Otro dato importante a tener en cuenta es que solo disponemos de una cámara, y por tanto, el sistema no puede encontrar el punto 3D asociado en una imagen debido a que cada punto de la línea OX proyecta al mismo píxel en el plano imagen; se pierde por tanto, el valor de la profundidad (eje Z). Además, al hacer la conversión entre los distintos sistemas de coordenadas del modelo *pinhole*, el valor de profundidad (de Z) también se pierde. Una aproximación que nos permita solucionar la limitación de tener una sola cámara es la hipótesis suelo.

La hipótesis suelo (Figura 6.23 tomada del artículo [Vega and Cañas, 2019]) supone que todos los objetos del mundo en 3D están pegados al suelo, por lo tanto, asumiendo que $Z = 0$, nos permitirá estimar la conversión de 2D a 3D con una sola cámara.

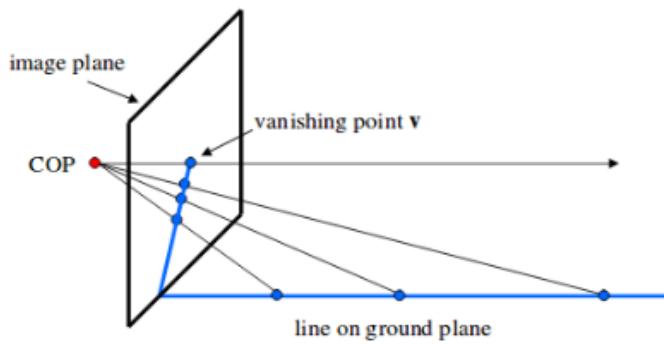


Figura 6.23: La hipótesis suelo asume que todos los objetos están en el suelo

Partimos de la solución ofrecida en el artículo [Vega and Cañas, 2019], donde los autores nos facilitan una infraestructura software que da soporte a esta hipótesis suelo usando el modelo pinhole, como nosotros. En él se detallan todos los pasos que se han explicado previamente y el código asociado con la obtención de los píxeles en coordenadas del mundo en 3D, se encuentra definido en `camera_pinholev2_node.py`¹²⁵.

6.3.3. Algoritmo de la lazada

Para calcular el área de las coordenadas del mundo real, se ha optado por seguir el algoritmo de la lazada¹²⁶ o también conocido como el área de Gauss. Este algoritmo matemático es usado para calcular el área de un polígono simple cuyos vértices están descritos como pares de coordenadas en el plano. Tiene múltiples aplicaciones en agrimensura y topografía.

¹²⁵https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/camera_pinholev2_node.py

¹²⁶https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%83rmula_de_l_%C3%A1rea_de_Gauss

El nombre de este algoritmo es debido al constante cruce de productos de las coordenadas, que simula atarse los cordones, como muestra la Ecuación 6.4.

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right|$$

Ecuación 6.4: Fórmula del algoritmo de la lazada

Donde A es el área del polígono, n es el número de lados del polígono y (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ son los vértices del polígono de forma alternativa.

Un ejemplo que ilustra este proceso y demuestra que se cumple el algoritmo de la lazada con respecto a la fórmula usada para calcular el área de un rectángulo, se puede apreciar en la Figura 6.24.

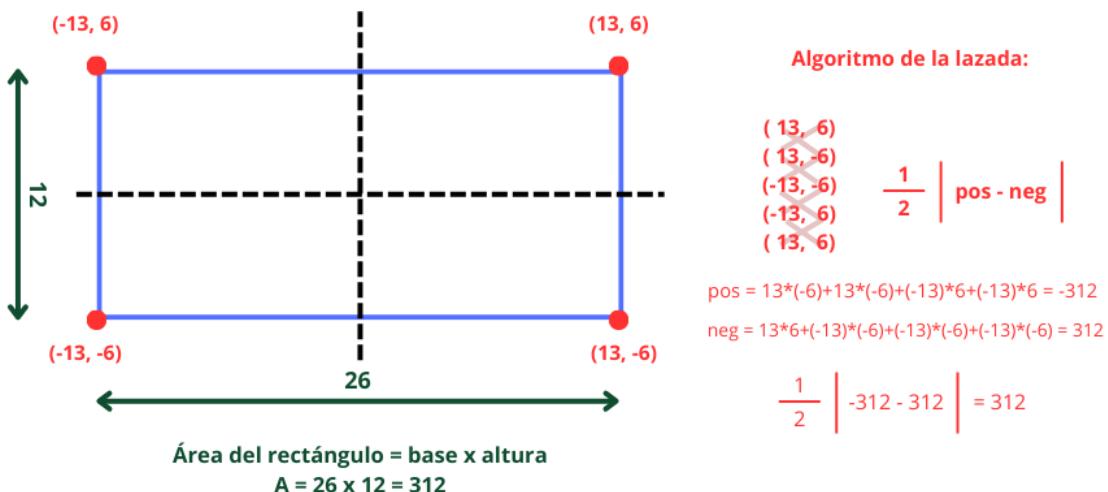


Figura 6.24: Demostración del algoritmo de la lazada

Este algoritmo aparece aplicado una vez que se ha convertido las coordenadas al sistema del mundo real en `camera_pinholev2_node.py`¹²⁷.

6.3.4. Interfaz Web

La forma que se decidió usar la *Interacción Humano-Robot* (HRI) para poder cumplir con el objetivo principal descrito en la Sección 3.1, fue a través de una interfaz web. Dicha interfaz web, ha sido creada gracias a las herramientas descritas en la Sección 4.2.11. `Rosbridge_server` permite a las páginas web (que actúan como

¹²⁷https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/camera_pinholev2_node.py

clientes) comunicarse con el servidor (que en este caso se inicializa en PiBotJ). Para acceder como cliente, en una ventana de un navegador hay que escribir `http://<ip de PiBotJ>:8000/index.html`, sustituyendo <ip de PiBotJ> por la IP obtenida al conectarse PiBotJ a la red.

Una vez habilitada esa comunicación, ya se podía apreciar la página web¹²⁸ (Figura 6.25). Se decidió incluir un mapa, usando OpenStreetMaps, en el que apareciese un marcador que tiene asociado el valor de área/volumen por cada bache detectado. Por otro lado, se decidió incluir una botonera para poder ser capaz de controlar el movimiento de las ruedas de PiBotJ cuando se quiera usar el modo teleoperado. Dicha botonera se conforma de cuatro botones que publican los distintos movimientos al robot, y cuando se deja de pulsar, el robot se para.

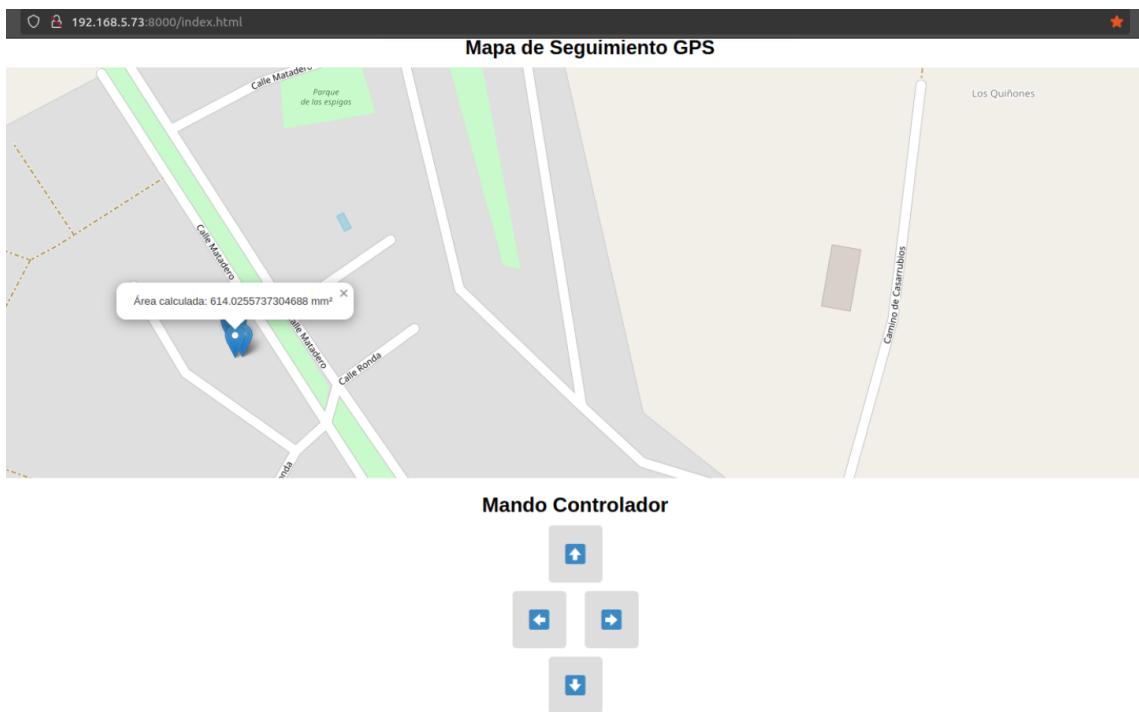


Figura 6.25: Interfaz web

6.3.5. Autónomo

PiBotJ ya se ha visto que se puede controlar de forma teleoperada, usando la botonera definida en la Sección 6.3.4 pero, para tener otra alternativa con respecto a la navegación de PiBotJ, se ha decidido implementar una lógica para que su movimiento sea autónomo.

¹²⁸<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/index.html>

Lo ideal para este caso es que PiBotJ fuera capaz de navegar autónomamente por carreteras pero debido a la imposibilidad de probarlo en ese entorno, se decidió hacer una recreación de una carretera real¹²⁹ a escala 769:10000 sobre una cartulina negra. En la Figura 6.26 (izquierda) se muestran las medidas reales y en la Figura 6.26 (derecha) se muestra las medidas definidas. El resultado final aparece en la Figura 6.27.

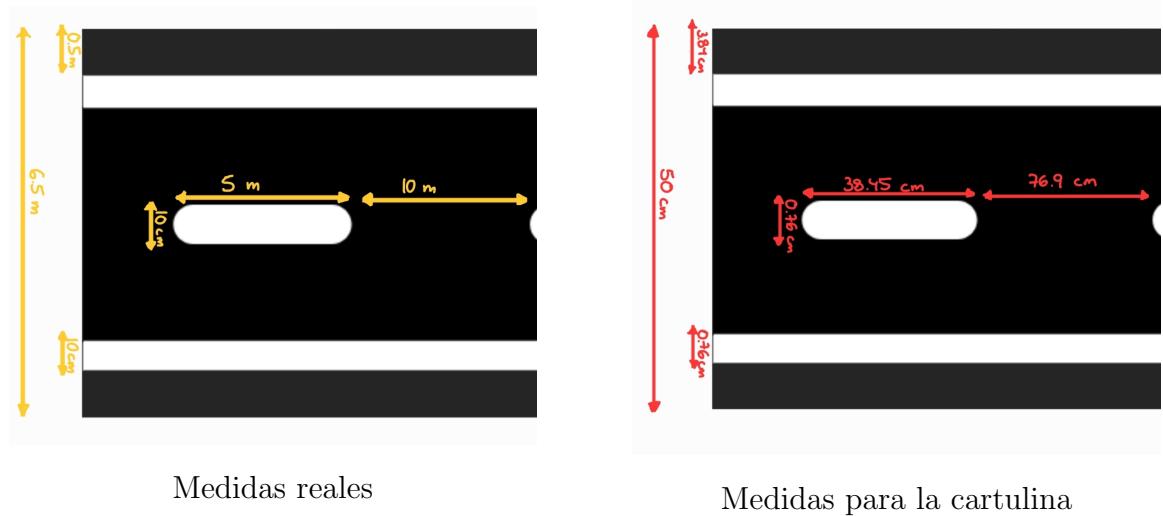


Figura 6.26: Conversión de medidas de la carretera

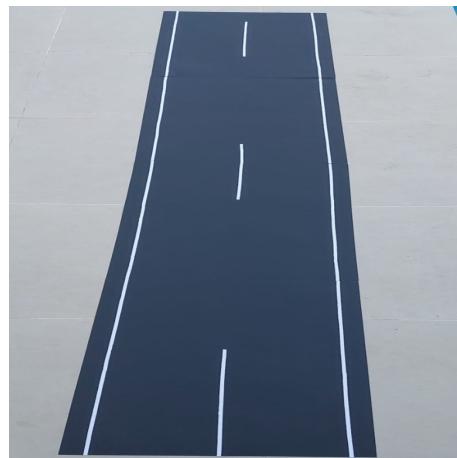


Figura 6.27: Carretera creada en cartulina

Una vez definido el entorno donde se iba a trabajar, era el momento de definir la lógica a usar y se decidió unir un algoritmo de detección de líneas junto a la técnica de navegación local conocida como *Virtual Force Field* (VFF).

¹²⁹<https://www.totalmentereflejante.com/medidas-rayas-de-carretera/>

Detección de líneas

Es importante tener en cuenta que este algoritmo se va a ejecutar únicamente cuando no haya bache en el entorno controlado. Para conseguirlo, es necesario procesar la imagen en escala de grises para detectar los contornos de las líneas, usando una umbralización adaptativa para destacar los bordes y una operación de apertura morfológica para eliminar pequeños puntos blancos que representan ruido en la imagen binaria (Código 6.3). El resultado final queda reflejado en la Figura 6.28 y el código está plasmado en `camera_dl_node.py`¹³⁰.

```
# Convierte la imagen a escala de grises
gray = cv2.cvtColor(resized_frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
# Aplica un umbral para destacar los bordes
th1 = cv2.adaptiveThreshold(gray, 255, cv2.ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C,
                             cv2.THRESH_BINARY, 23, -50)

# Elimina ruido
kernel = np.ones((3, 3), np.uint8)
opened_th1 = cv2.morphologyEx(th1, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
```

Código 6.3: Filtro para obtener las líneas blancas

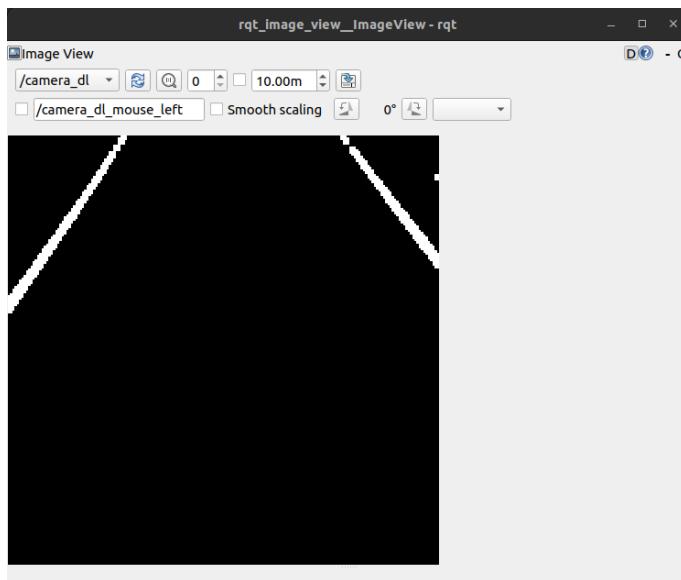


Figura 6.28: Filtro resultante aplicado para la detección de líneas

En la Figura 6.29 se puede ver los distintos tipos de situaciones a las que se enfrenta PiBotJ cuando detecta líneas y dependiendo de la situación, PiBotJ reaccionaría de

¹³⁰https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/camera_dl_node.py

una forma u otra. Cuando detecta las dos líneas, PiBotJ sigue recto mientras que si detecta únicamente una línea, deberá avanzar hacia adelante y si dicha línea no se encuentra en el centro de la imagen, PiBotJ giraría hasta que se situase en el centro. Por otro lado, si no detecta líneas avanzaría recto durante 3 segundos y empezaría a girar.

Distintos casos de detección de líneas de PiBotJ

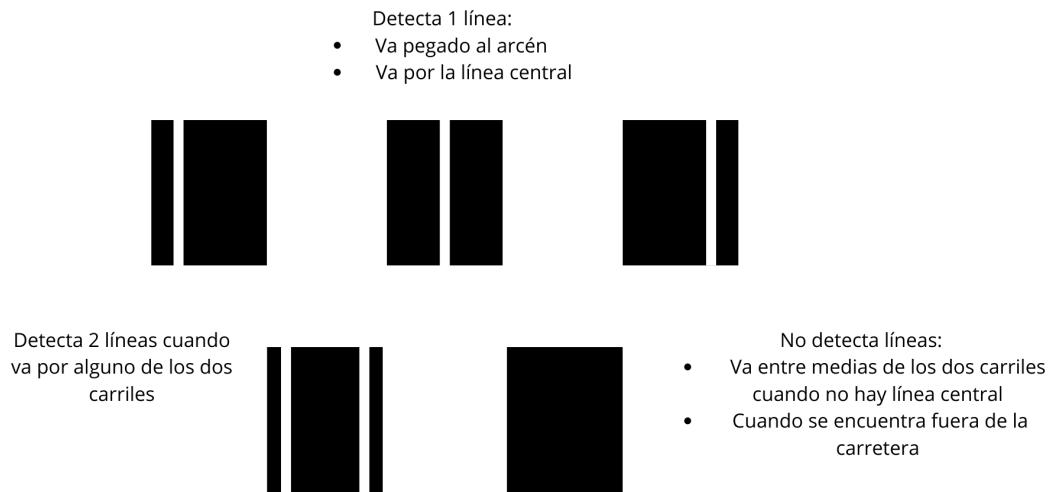


Figura 6.29: Distintos casos de la detección de líneas

Virtual Force Field

Es un método de navegación local para que un robot autónomo evite obstáculos en su entorno. Este método se compone de una fuerza repulsiva para evitar el obstáculo y de una fuerza atractiva para alcanzar el destino objetivo¹³¹. Estas fuerzas se suman vectorialmente para obtener una fuerza resultante, que indica la dirección y velocidad de movimiento del robot. Esta fuerza resultante se puede calcular siguiendo la Ecuacion 6.5.

$$F_{resultante} = \alpha \cdot F_{atractiva} + \beta \cdot F_{repulsiva}$$

Ecuación 6.5: Ecuación de VFF

El robot se mueve en la dirección de la fuerza resultante, ajustando su trayectoria en tiempo real según las posiciones del obstáculo y el objetivo. En este caso, se decidió

¹³¹<https://robmovjuloau2022.blogspot.com/2022/11/task-3-local-navigation-with-vff.html>

fijar como objetivo, un punto siempre hacia adelante y como repulsión, el punto más cercano detectado del contorno al robot, en coordenadas del mundo real, y aplicar la fuerza repulsiva respecto a él. La Figura 6.30 muestra la dirección de las distintas fuerzas. Todo está documentado en `camera_vff_node.py`¹³².

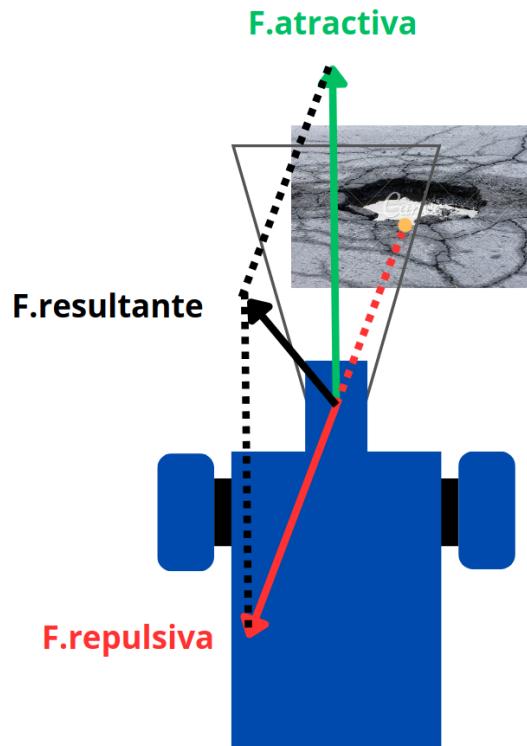


Figura 6.30: Diagrama de fuerzas del algoritmo VFF

¹³²https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/pibotj_rr/camera_vff_node.py

Capítulo 7

Experimentos

Toda la vida es un experimento. Cuantos más experimentos hagas, mejor

Ralph Waldo Emerson

En este capítulo se tratarán los diferentes experimentos llevados a cabo para la realización de este proyecto y que han permitido conseguir y demostrar la consecución del objetivo y subobjetivos definidos en la Sección 3.1.

7.1. Impresión 3D

Aparte de la solución proporcionada en la Sección 5.5, se probaron previamente distintas opciones de diseño y de impresión 3D hasta encontrar la mejor opción.

Primero se optó por diseñar la estructura como una pieza única para facilitar el trabajo de ensamblaje para los usuarios, sin embargo el resultado final no fue el esperado (Figura 7.1).

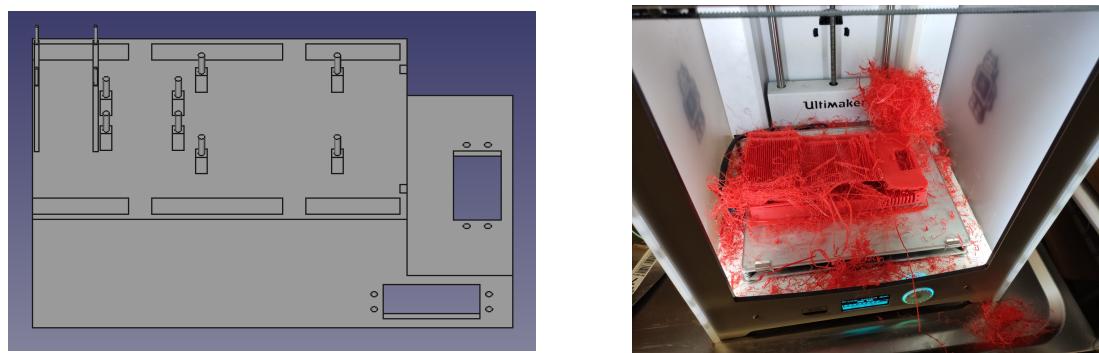


Figura 7.1: Versiones previas de impresión

Después de eso, se tuvo que cambiar el enfoque y se decidió dividirlo en diferentes piezas para intentar solucionar el problema, como se comentó en la Sección 5.4. En

ese momento se estaba usando otra impresora distinta a la definida en la Sección 5.5, llamada Ultimaker Cura 2+¹³³ y se empleó ABS en vez de PLA; por lo tanto, los parámetros de impresión fueron distintos (Cuadro 7.1) pero se producía *warping*. Para conocer más acerca de distintas pruebas, puedes consultarlas en la WIKI¹³⁴.

Características	Parámetros
Densidad	1.04 g/cm ³
Diámetro	2.85 mm
Temperatura de impresión	240 °C
Temperatura de la placa	110 °C
Temperatura en modo de espera	175 °C
Distancia de retracción	6.50 mm
Velocidad de retracción	40mm/s
Velocidad del ventilador	10 %

Cuadro 7.1: Características usadas en impresiones previas

7.2. Ruedas

Como se comentó en la Sección 4.1.5, en este proyecto se han usado dos tipos de ruedas que gracias a las distintas pruebas realizadas, se ha podido definir las características de cada una de ellas.

En el primer video¹³⁵ (Figura 7.2 izquierda) se puede ver a PiBotJ usando las ruedas negras y teniendo dificultades en superficies con irregularidades. Por otro lado, en el segundo video¹³⁶ (Figura 7.2 derecha) se puede ver a PiBotJ usando las ruedas azules genéricas y superando con mayor facilidad las dificultades que con las ruedas del kit *ActivityBot*.



Figura 7.2: Capturas de las pruebas de PiBotJ con las distintas ruedas

¹³³<https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-2-connect/>

¹³⁴<https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/wiki/HARDWARE#impresi%C3%B3n-3d>

¹³⁵<https://www.youtube.com/watch?v=G71mNFDIDuw>

¹³⁶<https://www.youtube.com/watch?v=BYluIeGEo6Q>

7.3. Detección de baches

Para conseguir el modelo de entrenamiento de red neuronal creado con YOLOv8, con formato .pb, que se explicó en la Sección 6.3.1, se realizaron numerosas pruebas pero finalmente para la etapa de entrenamiento se decidió usar la siguiente configuración (Figura 7.3). Está completamente recogido y facilitado en el fichero `args.yaml`¹³⁷.

```

1 task: segment
2 mode: train
3 model: yolov8l-seg.pt
4 data: /content/YOLOv8_Segmentation_DeepSORT_Object_Tracking/ultralytics/yolo/v8/segment/
      Pothole-Detection-Project-New-1/data.yaml
5 epochs: 120
6 patience: 50
7 batch: 16
8 imgsz: 640
9 save: true
10 cache: false
11 device: null
12 workers: 8
13 project: null
14 name: null
15 exist_ok: false
16 pretrained: false
17 optimizer: SGD
18 verbose: false
19 seed: 0
20 deterministic: true
21 single_cls: false
22 image_weights: false
23 rect: false
24 cos_lr: false
25 close_mosaic: 10
26 resume: false
27 overlap_mask: true
28 mask_ratio: 4

```

Figura 7.3: Parte de la configuración usada para el entrenamiento

Una vez creado, entrenado y convertido el modelo en el formato .tflite, formato compatible con Google Coral, se crearon distintas versiones que se describen a continuación.

- `detect.tflite`¹³⁸. Esta primera versión se realizó usando un dataset de 75 imágenes pero usa CPU y tiene baja reactividad: tiene una latencia de unos cuatro segundos.
- `detect_edgetpu.tflite`¹³⁹. Esta versión usa el dataset de 75 imágenes y se intentó que el modelo usase *Unidades de Procesamiento Tensorial* (TPU) del Google Coral pero no funcionó.

¹³⁷https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/args.yaml

¹³⁸https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/detect.tflite

¹³⁹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ROS2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/detect_edgetpu.tflite

- `best_full_integer_quant_edgetpu.tflite`¹⁴⁰. Esta versión usa el dataset definido en la Sección 6.3.1. En esta ocasión sí es capaz de usar TPU pero el modelo se moría a los pocos segundos de inicializarlo y era debido a que procesaba imágenes demasiado grandes.
- `bestv2_full_integer_quant_edgetpu.tflite`¹⁴¹. Esta es la la versión actual usada en el proyecto. A diferencia del ejemplo anterior procesa imágenes de 192x192 y así evitamos que el modelo se muera y funcione perfectamente. La latencia se ha reducido a más de un cuarto de la primera versión y permite el correcto funcionamiento del modelo.

En la Sección 6.3.1 también se comenta cómo conseguir que los valores obtenidos sean estables usando EMA y a continuación se puede ver una gráfica que demuestra su correcta aplicación (Figura ??).

7.3.1. Obtención del contorno y coordenadas del bache

Para la obtención de las coordenadas del bache detectado, se probaron distintas opciones. La primera de ellas fue tomar la imagen en la que se consideraba que tenía bache y a partir de ella, aplicando un desenfoque gaussiano, convirtiéndola en escala de grises, se aplicó el detector de bordes de Canny, utilizando a ojo 80 como umbral mínimo y 180 como umbral máximo. El problema que tenía esta opción era que el contorno a buscar se aplicaba a toda la imagen y no solo dónde se encontraba el bache, produciéndose en ocasiones la detección incorrecta (Figura 7.4).

La segunda y última opción para realizar la detección del contorno, descrita en la Sección 6.3.1 y se puede ver gracias al Código 7.1. Siendo el valor de 0,6 en el paso de binarizar la máscara, el elegido para decidir si hay bache o no en la imagen. El resultado final se muestra en la Figura 7.5.

7.4. Modelo de cámara pinhole

Los pasos seguidos para la aplicación del modelo pinhole para la cámara están definidos en la Sección 6.3.2 pero antes de decidir si el modelo pinhole era adecuado para el proyecto, se realizaron una serie de experimentos. Para la realización de los

¹⁴⁰https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/best_full_integer_quant_edgetpu.tflite

¹⁴¹https://github.com/RoboticsURJC/tfg-jlopez/blob/main/code/ros2/src/pibotj_rr/custom_model_lite/bestv2_full_integer_quant_edgetpu.tflite

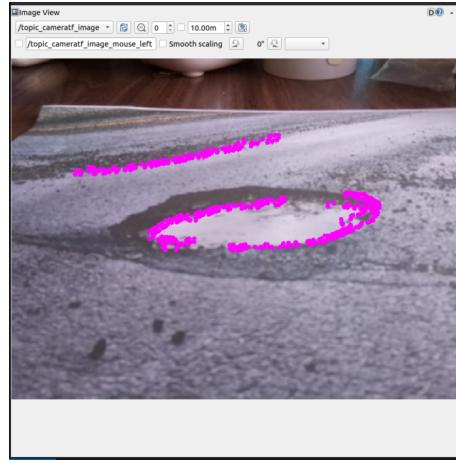


Figura 7.4: Primera versión en la obtención del contorno del bache

```
def extract_contour_pixels(self, pothole_mask, resized_frame):
    # Escalar para que aparezca en el tamaño correcto
    scale_factor = 192 / 48
    # Binarizar la mascara del bache
    _, binary_mask = cv2.threshold(pothole_mask, 0.6, 1,
                                    cv2.THRESH_BINARY)

    # Encontrar los contornos del bache
    contours, _ = cv2.findContours(binary_mask.astype(np.uint8),
                                   cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

Código 7.1: Cómo obtener el contorno del bache

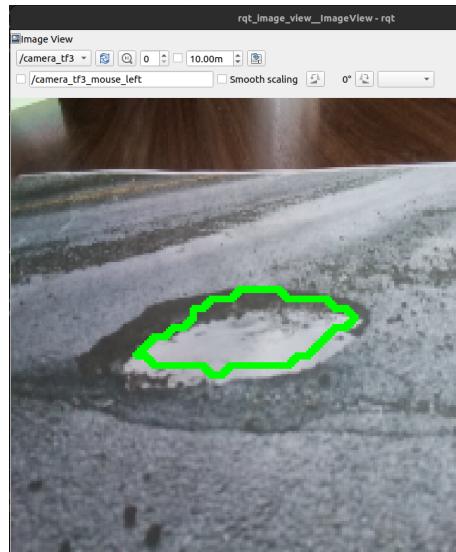


Figura 7.5: Versión final en la obtención del contorno del bache

mismos, se ha usado una cartulina de tamaño A3 pintada de cuadrados de 1x1 cm para

asegurarnos que las medidas obtenidas eran lo más exactas posibles. El experimento se completa con un círculo recortado de color rosa que será detectado por un filtro de imagen y el algoritmo devolverá la posición del círculo en la vida real. Un ejemplo completo aparece en este video¹⁴² (Figura 7.6).

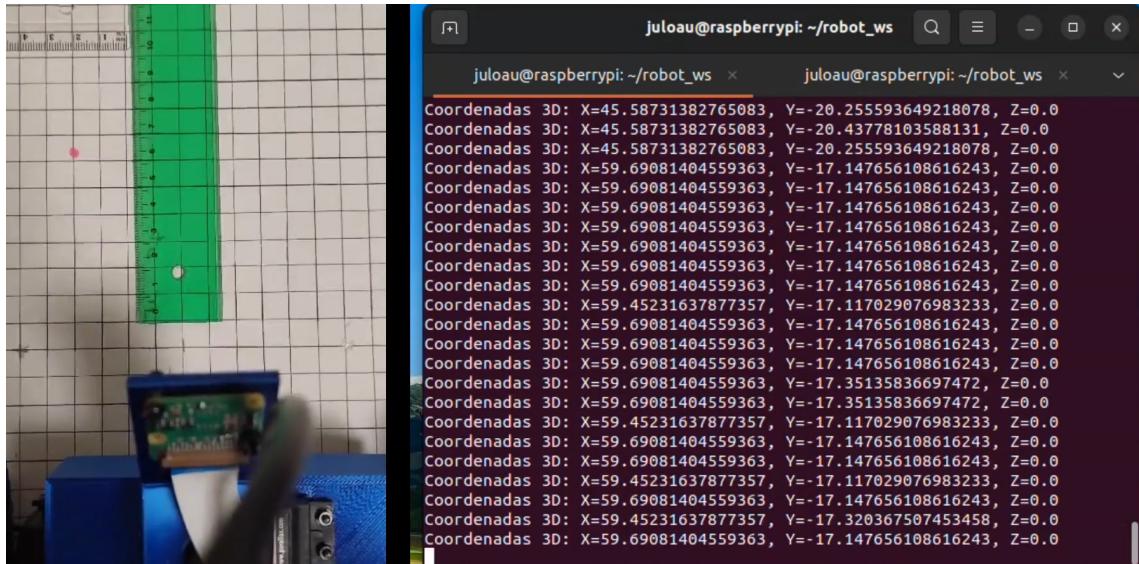


Figura 7.6: Captura del video que demuestra el modelo pinhole

7.5. Algoritmo de la lazada

Al igual que en la Sección 6.3.3 se definió y se ejemplificó de manera teórica el funcionamiento del algoritmo de la lazada, a continuación se va a demostrar su funcionamiento pero en este caso usando un bache impreso. En la Figura 7.7 se puede ver las medidas reales del bache. Según la forma del bache, para demostrar que las medidas obtenidas del algoritmos son correctas, la figura que más se le parece es una elipse¹⁴³. El cálculo del área teórica aparece en la Ecuación 7.1, y por lo tanto, el área calculada usando el algoritmo de la lazada no debe superar el valor del área teórica.

$$Area_{bache} = R_a \cdot R_b \cdot \pi$$

Ecuación 7.1: Fórmula para calcular el área de una elipse

En el video¹⁴⁴ (Figura 7.8) se puede ver que en ningún momento el valor calculado

¹⁴²<https://www.youtube.com/watch?v=DxXaz5MFIqU>

¹⁴³<https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/area-elipse/>

¹⁴⁴ https://www.youtube.com/watch?v=E-q_aclKNqI

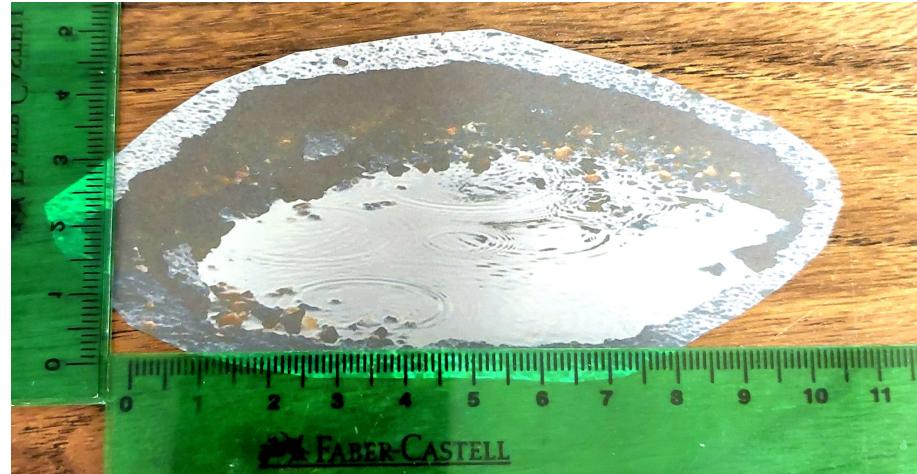


Figura 7.7: Medidas del bache

de área no supera el valor teórico y son resultados coherentes; demostrando así que el algoritmo de la lazada es una buena opción para calcular el área.

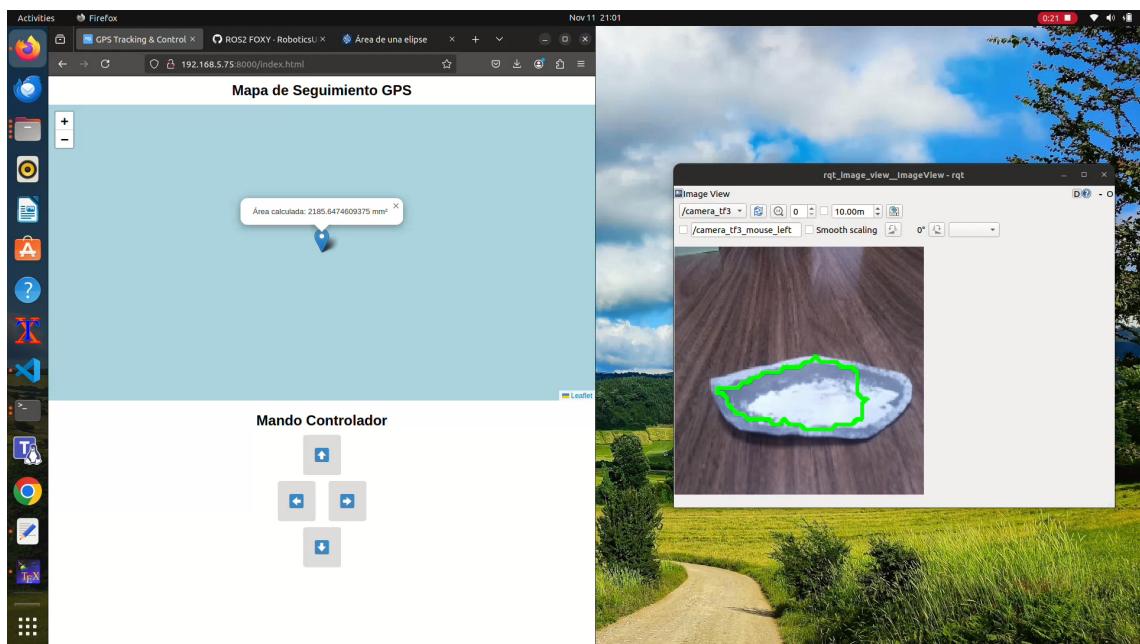


Figura 7.8: Captura del vídeo que calcula el área usando el algoritmo de la lazada

7.6. VFF

Para evitar los baches se decidió usar el algoritmo VFF, descrito en la Sección 6.3.5, y para demostrar su funcionamiento, se ha decidido crear un video¹⁴⁵ que recoge los distintos casos que puede ocurrir (Figura ??).

7.7. Ejecución completa de la aplicación

A continuación se pueden apreciar los dos ejemplos creados que engloban las posibles opciones que existen de poner en funcionamiento a PiBotJ, que son de forma teleoperada y de forma autónoma. Dentro de cada apartado se podrá apreciar qué comando es necesario lanzar en cada caso, un esquema de cómo funciona cada nodo dentro del *launcher* y capturas de pantalla de cada vídeo.

7.7.1. Teleoperado

Para ejecutar a PiBotJ de forma teleoperada, hay que ejecutar el *launcher*: `ros2 launch pibotj_rr robot_teleop.launch.py`. Dentro del *launcher* se puede distinguir una serie de nodos conectados, como muestra la Figura 7.9. Una ejecución completa de este ejemplo, se puede apreciar en este video¹⁴⁶ (Figura ??).

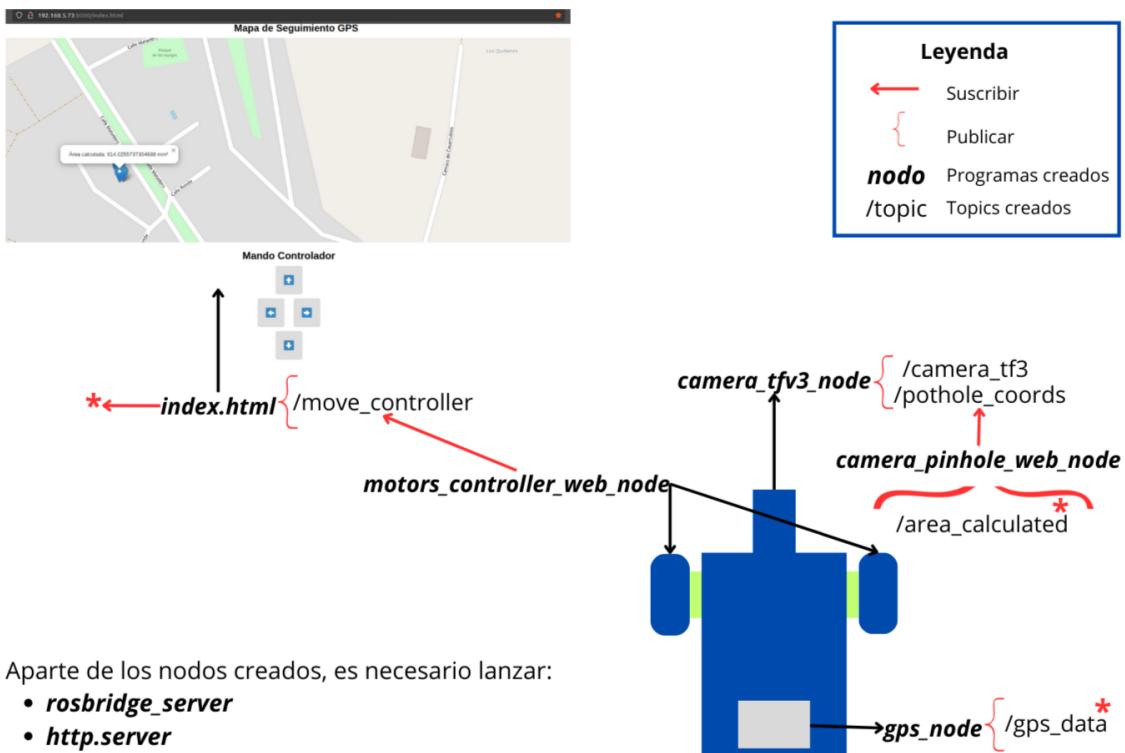


Figura 7.9: Esquema de nodos para el modo teleoperado

7.7.2. Autónomo

Para ejecutar a PiBotJ de forma autónoma, hay que ejecutar el *launcher*: `ros2 launch pibotj_rr robot_vff.launch.py`. Dentro del *launcher* se puede distinguir una serie de nodos conectados, como muestra la Figura 7.10. Una ejecución completa de este ejemplo, se puede apreciar en este video¹⁴⁷ (Figura ??).

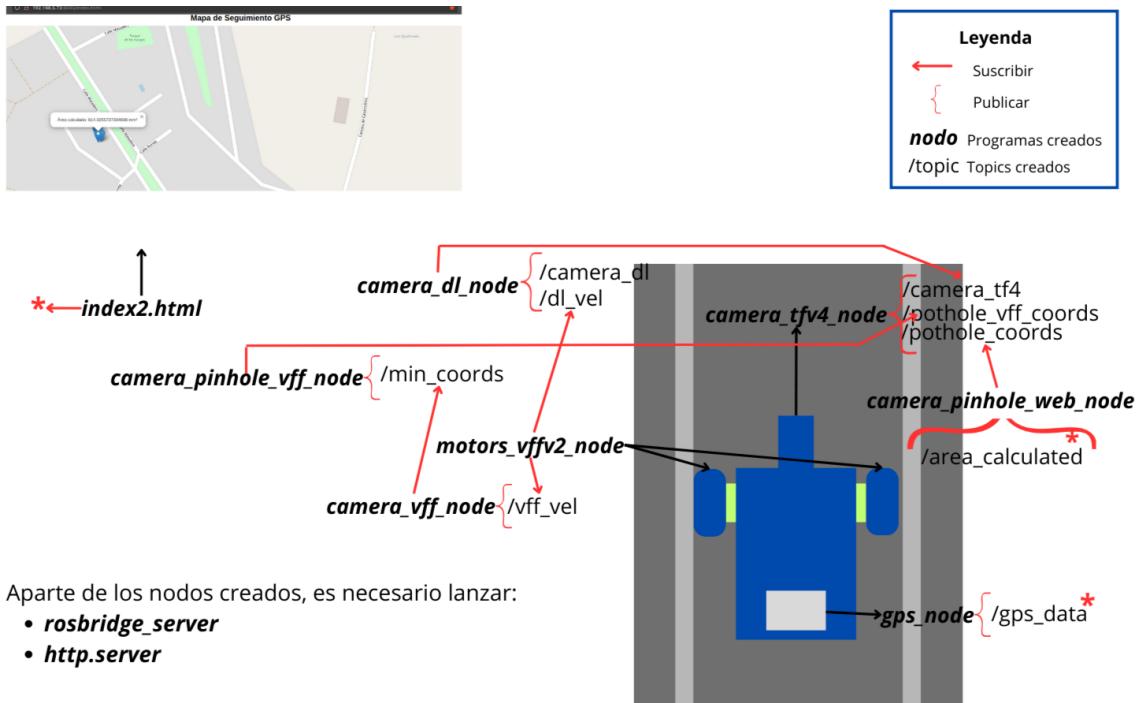


Figura 7.10: Esquema de nodos para el modo autónomo

Capítulo 8

Conclusiones

La mente lo es todo. En lo que piensas, te conviertes

Buda

En este último capítulo se van a detallar todos los objetivos y requisitos cumplidos; así como las competencias adquiridas a lo largo de todo el proyecto. Finalmente se concluirá la memoria exponiendo las posibles líneas futuras para el proyecto.

8.1. Objetivos y requisitos cumplidos

A continuación se van a explicar todos los objetivos y requisitos cumplidos a lo largo de la realización del presente trabajo fin de grado.

8.1.1. Objetivos

Es importante destacar que se ha conseguido cumplir con el objetivo principal de este trabajo fin de grado: crear un robot que, usando materiales de bajo coste, sea capaz de navegar por las carreteras, detectar los baches que vaya encontrando y sea capaz de estimar el área del bache para hacer una estimación media del volumen que ocupa dicho bache y poder ser tapado; todo ello registrado sobre una interfaz web. A decir verdad, se ha cumplido cada uno de los subobjetivos establecidos en la Sección 3.1:

1. Se han investigado las soluciones robóticas actuales, encontrándose muchas de ellas en fase todavía de experimentación.
2. Se han seleccionado los componentes *hardware* más adecuados para el robot, siendo los elegidos, los de menor coste. Además, se ha sugerido distintas opciones

para abaratar los costes así como, consejos para facilitar el diseño y robustez del robot.

3. Se han analizado las diferentes opciones de diseño que gracias a los bocetos y maquetas, han permitido ir perfilando la idea del diseño hasta encontrar la solución final.
4. Se ha usado FreeCAD como herramienta de diseño CAD, conocida como una de las herramientas de diseño libre.
5. Como se ha explicado tanto en las Secciones 5.5 y 7.1, en todas las pruebas de impresión se han usado materiales típicos de impresión 3D: tanto PLA como ABS.
6. Se ha desarrollado y construido el robot tanto para simulación, usando URDF y ROS 2 Control, como en la vida real, configurando cada componente a bajo nivel.
7. Al robot se le ha dotado de nodos en ROS2 para conseguir aplicar el objetivo principal en la vida real.
8. Para demostrar la viabilidad del proyecto, se han realizado experimentos de cada uno de los componentes, así como se ha proporcionado dos posibles aplicaciones completas para poder usar el robot.

8.1.2. Requisitos

También hay que destacar que se han satisfecho todos los requisitos propuestos en la Sección 3.2:

1. El coste total de la fabricación del robot ha sido de 237,12€, siendo 250€ el límite establecido.
2. Todas las piezas diseñadas están pensadas para ser impresas en cualquier impresora 3D, habiéndose probado los diseños en dos impresoras distintas.
3. Se ha usado el sistema operativo Ubuntu con soporte a largo plazo, en distintas versiones, tanto para el ordenador como para el robot.
4. Para el entrenamiento de los modelos, se ha usado Google Colaboratory y así se cumple el requisito de no ser necesario disponer de ninguna tarjeta gráfica de uso dedicado para conseguirlo.

5. Los modelos entrenados se han convertido al formato necesario para conseguir que funcione a pesar de las limitaciones hardware de Raspberry Pi y la PiCamera.
6. Para todo el proyecto, se ha usado ROS 2 para conseguir que sea un proyecto a largo plazo.

8.2. Habilidades desarrolladas

Además de todas las competencias nombradas en la Sección 3.3, se han desarrollado numerosas habilidades y conocimientos, de los cuáles a destacar:

- Se han adquirido conocimientos muy profundos sobre cómo investigar sobre un tema y cómo llevarlo a cabo.
- Se han adquirido conocimientos profundos de la herramienta FreeCAD.
- Se ha adquirido conocimientos sobre los parámetros a modificar en una impresión y las necesidad que esta necesita (ventanas cerradas, uso de laca, etc).
- Se ha adquirido conocimientos sobre mecánica y ensamblaje de piezas.
- Se ha adquirido la habilidad de construir al robot en simulación.
- Se ha adquirido conocimientos profundos sobre ROS2 Control.
- Se ha adquirido el conocimiento de poder configurar y conocer a bajo nivel todos los componentes *hardware*.
- Se ha adquirido conocimientos profundos sobre direcciones IP, conexiones ssh y derivados.
- Se ha adquirido la habilidad de implementar un modelo de aprendizaje supervisado sobre un dispositivo de limitaciones computacionales
- Se ha adquirido conocimientos muy profundos sobre el sensor cámara y cómo extraer información de ella para finalmente conocer el área del bache.
- Se ha adquirido habilidades sobre desarrollo de páginas web y cómo están relacionadas con ROS 2.
- Se ha adquirido la habilidad de ser capaz de redactar y generar documentación de calidad.

8.3. Líneas futuras

Finalmente, para permitir la continuidad de este proyecto, se han planteado una serie de líneas futuras a tener en cuenta:

- Dar soporte software al robot en simulación.
- Integrar, configurar y dar soporte software al motor de la cámara.
- Modificar la altura de la cámara para conseguir mayor alcance.
- Continuar dando soporte a PiBotJ para mantenerlo actualizado en la última versión.
- Conseguir implantar a PiBotJ como ayudante de mantenimiento y que en un futuro se pueda aplicar a las carreteras.

Apéndice A

Configuración de PiBotJ

Las ideas no duran mucho. Hay que hacer algo con ellas

Santiago Ramón y Cajal

Una vez el robot ya está construido, es necesario configurarlo tanto para simulación como para poder ejecutarlo en la vida real. Para ello, es necesario seguir los siguientes pasos:

A.1. Simulación

Primero de todo, hay que instalar los siguientes programas:

```
sudo apt update && sudo apt upgrade
sudo apt install ros-humble-ros2-control ros-humble-ros2-controllers
sudo apt install ros-humble-rviz2
sudo apt install ros-humble-gazebo-ros-pkgs
sudo apt install ros-humble-xacro ros-humble-robot-state-publisher
sudo apt install ros-humble-joint-state-publisher
```

Una vez instalados, únicamente hay que ejecutar el programa que permita que el robot en simulación se inicie. Para ello, únicamente hay que escribir los siguientes comandos:

```
colcon build --packages-select pibotj_r2c    # compila los paquetes
source ./install/setup.bash                  # configura variables
ros2 launch pibotj_r2c launch_sim.launch.py
```

Si la primera vez que se lance el robot ocurre algún error no te preocupes, es normal. Tienes que volver a escribir los comandos, de nuevo, en la terminal.

A.2. Robot real

Hay que seguir los siguientes pasos:

1. Instalar *Raspberry Pi Imager*: `sudo apt install rpi-imager`.
2. Descargar la imagen de Ubuntu 20.04 Server¹.
3. Abrir *rpi-imager* y seguir los pasos que aparecen por pantalla.
4. Conectarse al robot usando `ssh usuario@ip_dispositivo` con la contraseña introducida en el Paso 3.
5. Ya estás dentro del robot y puedes operar con él.
6. Tienes que instalar ROS 2 Foxy².
7. Ya puedes configurar cada uno de los componentes del robot.

Al no tener disponible interfaz gráfica, la única forma de comunicarse con el robot es a través de ssh y variantes de esta como scp para copiar directorios entre el robot y el ordenador local.

Otra opción para poder desarrollar código es usar un *plugin* de VSCode (desde el ordenador local) que permite usar VSCode conectándose al robot usando ssh³.

A.2.1. Cámara

La cámara está conectada al puerto CSI y, para hacerla funcionar, se necesitan instalar los siguientes programas:

```
sudo apt-get install gstreamer1.0-tools \
gstreamer1.0-plugins-base gstreamer1.0-plugins-good \
gstreamer1.0-plugins-bad gstreamer1.0-plugins-ugly
```

Una vez instalados, hay que seguir los siguientes pasos:

1. Editar el fichero `/boot/firmware/config.txt` añadiendo `start_x=1` al final.

¹<https://releases.ubuntu.com/20.04.6/>

²<https://docs.ros.org/en/foxy/Installation/Ubuntu-Install-Debians.html>

³<https://code.visualstudio.com/docs/remote/ssh-tutorial>

2. Reiniciar la Raspberry: `sudo reboot`.
3. Comprobar que la configuración es correcta: `v4l2-ctl --list-devices`.

En la Figura A.1 se puede ver el resultado del Paso 3 y muestra que la cámara se encontraba conectada en el dispositivo `/dev/video0`.

```
julioau@raspberrypi:~$ v4l2-ctl --list-devices
bcm2835-codec-decode (platform:bcm2835-codec):
/dev/video10
/dev/video11
/dev/video12
/dev/media1

bcm2835-isp (platform:bcm2835-isp):
/dev/video13
/dev/video14
/dev/video15
/dev/video16
/dev/media0

mmal service 16.1 (platform:bcm2835-v4l2):
/dev/video0
```

Figura A.1: Dispositivos de video y media disponibles en PiBotJ

A.2.2. Google Coral

Para su configuración hay que seguir los siguientes pasos:

1.

```
echo "deb https://packages.cloud.google.com/apt \
coral-edgetpu-stable main" | \
sudo tee /etc/apt/sources.list.d/coral-edgetpu.list
```

2.

```
curl https://packages.cloud.google.com/apt/doc/apt-key.gpg \
| sudo apt-key add -
```

3. `sudo apt-get update`.
4. `sudo apt-get install libedgetpu1-std`.
5. Conecta el USB en uno de los puertos 3.0.
6. `sudo apt-get install python3-pycoral`.

Finalmente, el proceso se debería haber completado de forma exitosa cuando la salida del último comando se debería ver como muestra la Figura A.2.

```
julioau@raspberrypi:~$ sudo apt-get install python3-pycoral
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
The following additional packages will be installed:
  python3-tflite-runtime
The following NEW packages will be installed:
  python3-pycoral python3-tflite-runtime
0 upgraded, 2 newly installed, 0 to remove and 0 not upgraded.
Need to get 3,819 kB of archives.
After this operation, 16.5 MB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n] y
Get:1 https://packages.cloud.google.com/apt coral-edgetpu-stable/main arm64 python3-tflite-runtime arm64 2.5.0.post1 [3,014 kB]
Get:2 https://packages.cloud.google.com/apt coral-edgetpu-stable/main arm64 python3-pycoral arm64 2.0.0 [804 kB]
Fetched 3,819 kB in 2s (1,741 kB/s)
Selecting previously unselected package python3-tflite-runtime.
(Reading database ... 207067 files and directories currently installed.)
Preparing to unpack .../python3-tflite-runtime_2.5.0.post1_arm64.deb ...
Unpacking python3-tflite-runtime (2.5.0.post1) ...
Selecting previously unselected package python3-pycoral.
Preparing to unpack .../python3-pycoral_2.0.0_arm64.deb ...
Unpacking python3-pycoral (2.0.0) ...
Setting up python3-tflite-runtime (2.5.0.post1) ...
Setting up python3-pycoral (2.0.0) ...
julioau@raspberrypi:~$
```

Figura A.2: Configuración exitosa del Google Coral

A.2.3. Módulo GPS

Hay que seguir los siguientes pasos:

1. Crear el fichero `/etc/udev/rules.d/99-ttyAMA0.rules`.
2. Añádele: `KERNEL=="ttyAMA0", MODE=="0666", GROUP="dialout"`.
3. `sudo udevadm control --reload-rules`.
4. `sudo udevadm trigger`.
5. Las reglas se habrán actualizado.
6. Instalar `raspi-config`⁴.
7. Ejecuta `raspi-config` usando `sudo raspi-config`
8. Dentro de `raspi-config` hay que desplazarse hasta *Interfacing options* y *serial*.
9. Desabilita *serial login shell* y habilita *serial interface*.
10. Reiniciar la Raspberry: `sudo reboot`

Finalmente los siguientes ficheros tienen que contener la siguiente información:

⁴https://github.com/EmilGus/install_raspi-config/tree/master

```
cat /boot/firmware/config.txt

# Please DO NOT modify this file; if you need to modify the boot config,
# the "usercfg.txt" file is the place to include user changes. Please
# refer to the README file for a description of the various configuration
# files on the boot partition.

# The unusual ordering below is deliberate; older firmwares (in particular
# the version initially shipped with bionic) don't understand the
# conditional
# [sections] below and simply ignore them. The Pi4 doesn't boot at all
# with firmwares this old so it's safe to place at the top. Of the Pi2 and
# Pi3, the Pi3 uboot happens to work happily on the Pi2, so it needs to go
# at the bottom to support old firmwares.

[pi4]
kernel=uboot_rpi_4.bin

[pi2]
kernel=uboot_rpi_2.bin

[pi3]
kernel=uboot_rpi_3.bin

[pi0]
kernel=uboot_rpi_3.bin

[all]
device_tree_address=0x03000000

[pi4]
max_framebuffers=2
arm_boost=1

[all]
# Enable the audio output, I2C and SPI interfaces on the GPIO header. As
# these
# parameters related to the base device-tree they must appear *before* any
# other dtoverlay= specification
dtparam=audio=on
dtparam=i2c_arm=on
dtparam=spi=on

# Comment out the following line if the edges of the desktop appear
# outside
# the edges of your display
disable_overscan=1

# If you have issues with audio, you may try uncommenting the following
# line
# which forces the HDMI output into HDMI mode instead of DVI (which
```

```
      doesn't
# support audio output)
#hdmi_drive=2

# Config settings specific to arm64
arm_64bit=1
dtoverlay=dwc2

[cm4]
# Enable the USB2 outputs on the IO board (assuming your CM4 is plugged
# into
# such a board)
dtoverlay=dwc2,dr_mode=host

[all]

# The following settings are "defaults" expected to be overridden by the
# included configuration. The only reason they are included is, again, to
# support old firmwares which don't understand the "include" command.

enable_uart=1
cmdline=cmdline.txt

include syscfg.txt
include usercfg.txt

start_x=1

cat /boot/firmware/cmdline.txt

elevator=deadline net.ifnames=0 dwc_otg.lpm_enable=0 root=LABEL=writable \
rootfstype=ext4 rootwait fixrtc quiet splash cfg80211.ieee80211_regdom=GB

cat /boot/firmware/usercfg.txt

# Place "config.txt" changes (dtparam, dtoverlay, disable_overscan, etc.)
# in
# this file. Please refer to the README file for a description of the
# various
# configuration files on the boot partition.
dtoverlay=pi3-disable-bt

cat /boot/firmware/syscfg.txt

# This file is intended to be modified by the pibootctl utility. User
# configuration changes should be placed in "usercfg.txt". Please refer
# to the
# README file for a description of the various configuration files on the
# boot
# partition.
```

```
enable_uart=1  
dtparam=audio=on  
dtparam=i2c_arm=on  
dtparam=spi=on  
cmdline=cmdline.txt
```

Debido a la distribución de Ubuntu usada, hay problemas al encender la Raspberry Pi si tiene algo a través del puerto serie⁵, pero las sugerencias de otros usuarios no conseguían hacer funcionar bien el módulo; por lo tanto, la única solución encontrada es desconectar el módulo GPS hasta que se inicia sesión a través de ssh y luego conectar el módulo.

El módulo GPS realmente capta información válida cuando se enciende el LED que tiene integrado. Una forma fiable para que el módulo reciba todo el rato señal correcta es dejarle en el exterior hasta que se encienda el LED y luego poder operar con el módulo en interior o exterior.

A.2.4. Servomotores

Hay que seguir los siguientes pasos:

1. sudo apt-get update.
2. sudo apt-get install rpi.gpio-common python3-pigpio
3. sudo apt-get install python3-gpiozero python3-rpi.gpio.
4. Hay que añadir *dialout* a *groups*.
5. Los motores ya estarán listos para usarse importando la librería RPi.GPIO.

⁵https://wiki.ubuntu.com/EoanErmine/ReleaseNotes#Raspberry_Pi

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.
- [Hansun, 2013] Hansun, S. (2013). A new approach of moving average method in time series analysis. In *2013 Conference on New Media Studies (CoNMedia)*, pages 1–4.
- [Hartley and Zisserman, 2004] Hartley, R. I. and Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition.
- [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.
- [moinfaisal, 2023] moinfaisal (2023). Pothole detection project new dataset. <https://universe.roboflow.com/moinfaisal/pothole-detection-project-new>. visited on 2024-10-26.
- [Nilsson et al., 1984] Nilsson, N. J. et al. (1984). *Shakey the robot*, volume 323. Sri International Menlo Park, California.
- [Ortiz et al., 2017] Ortiz, L., Gonçalves, L., and Cabrera, E. (2017). A generic approach for error estimation of depth data from (stereo and rgb-d) 3d sensors.
- [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 and Cañas, 2018] Vega, J. and Cañas, J. (2018). PiBot: An open low-cost robotic platform with camera for STEM education. *Electronics*, 7:430–446.
- [Vega and Cañas, 2019] Vega, J. and Cañas, J. (2019). Open vision system for low-cost Robotics education. *Electronics*, 8:1295–1315.
- [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.