



ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

TRABAJO FIN DE GRADO

Conducción autónoma en CARLA basado en
aprendizaje por refuerzo

Autor: Juan Camilo Carmona Sánchez

Tutor: Dr. Roberto Calvo Palomino

Curso académico 2023/2024

Agradecimientos

Madrid, 30 de junio de 2023

Verónica Tornero Écija

Resumen

La conducción autónoma representa una de las revoluciones tecnológicas más grandes y significativas del siglo XXI. Los pequeños avances que se logran día a día en este ámbito nos ponen un poquito más cerca de un futuro que tiempo atrás parecía utópico e inalcanzable, en el que las personas podremos pasarle el testigo de la movilización humana a las máquinas y dejarlas encargadas por completo de nuestro transporte a lo largo de ciudades, países y continentes. En este proyecto se busca aportar un pequeño avance más de los ya mencionados, explorando la aplicación del aprendizaje por refuerzo (RL, por sus siglas en inglés) en el ámbito de la conducción autónoma, utilizando el simulador CARLA como plataforma experimental y de desarrollo. CARLA,

con su entorno realista y parámetros de control finamente detallados, ofrece un terreno fértil para investigar cómo los agentes basados en RL pueden aprender políticas de conducción eficientes, seguras y, sobre todo, autónomas a partir de la interacción con su entorno, sin necesidad de indicaciones previas ni ningún tipo de razonamiento humano detrás de las decisiones efectuadas en cada momento. Esta línea de desarrollo se alinea con el núcleo conceptual de los vehículos autónomos, que deben ser capaces de adaptarse y responder a situaciones imprevistas en tiempo real. En este trabajo se describe de

manera detallada y profunda la creación, actuación, rendimiento y comparación de un agente de aprendizaje por refuerzo dotado de la capacidad para aprender por sí mismo a navegar de manera fluida y acertada por un carril de carretera. Se abordan desafíos específicos relacionados con la alta dimensionalidad del espacio de acción y observación, la naturaleza estocástica del tráfico tanto en el entorno urbano como el interurbano y la necesidad de proveer un comportamiento que pueda garantizar la integridad tanto del vehículo como de los posibles pasajeros que puedan ocupar este mismo. Para lograr esta hazaña, se implementarán técnicas de aprendizaje por refuerzo junto con algoritmos avanzados de real-time y redes neuronales, entre otros efectos del mundo de la inteligencia artificial. El análisis de los resultados obtenidos pone de manifiesto la capacidad del agente para aprender políticas de conducción complejas, así

como los retos inherentes al equilibrio entre exploración y explotación en un dominio donde los errores pueden tener consecuencias significativas. Se discuten las limitaciones actuales del enfoque y se esbozan direcciones para futuras investigaciones, incluyendo la integración de otras fuentes de información y la adaptación a condiciones de conducción más desafiantes. Además, todo esto se compara con los resultados proporcionados por una amplia gama de métodos más tradicionales de conducción autónoma en los que la inteligencia artificial no está presente y el agente está sujeto a las indicaciones, etiquetas y reglas previamente definidas por el humano. En conclusión, este proyecto busca arrojar luz sobre el potencial del aprendizaje por refuerzo como herramienta para avanzar en el desarrollo de sistemas de conducción autónoma, al tiempo que subraya la importancia de la simulación y experimentación en entornos controlados y realistas como CARLA. Y, sobre todo, acercar a la sociedad humana la conducción del futuro.

Acrónimos

TFG Trabajo Fin de Grado

IA Inteligencia Artificial

PID Proporcional Integral Derivativo

GUI Intefaz Gráfica de Usuario

TF TensorFlow

FPS *Frames Per Second*

SAE *Sociedad de ingenieros automotrices*

ADAS *Sistemas avanzados de ayuda a la conducción*

ISA *Asistente inteligente de velocidad*

LKA *Sistema de mantenimiento de carril*

REV *Sistema detector de marcha atrás*

RL *Reinforcement learning*

DL *Deep learning*

RT *Real time*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. La robótica	1
1.2. Los robots móviles	2
1.3. La conducción autónoma	3
1.4. La inteligencia artificial en la conducción autónoma	8
1.5. Conducción autónoma en CARLA basada en aprendizaje por refuerzo	9
2. Objetivos	11
2.1. Descripción del problema	11
2.2. Objetivos	11
2.3. Requisitos	12
2.4. Metodología	12
2.5. Plan de trabajo	13
Bibliografía	15

Índice de figuras

1.1.	Disciplinas que componen la robótica.	1
1.2.	Ilustración de un robot móvil generado por IA.	2
1.3.	Ilustración de coches autónomos generada por Inteligencia Artificial (IA).	4
1.4.	Niveles de conducción autónoma según el estándar J3016.	6
1.5.	Vehículo tesla.	7
1.6.	Ilustración de una red neuronal.	9
2.1.	Ilustración de la metodología scrum.	13

Listado de códigos

Índice de cuadros

Capítulo 1

Introducción

1.1. La robótica

La robótica es una disciplina compleja que se conforma de distintas áreas y campos de la ciencia y la tecnología. Entre ellas, las más destacables serían la mecánica, la electrónica y la informática, la ingeniería de control, la física y la inteligencia artificial. Todas estas disciplinas se unen en una que pretende idear, diseñar y construir robots, máquinas capaces de realizar de manera automática y preferiblemente autónoma una o un conjunto de tareas para las cuales esta ha sido designado [1]

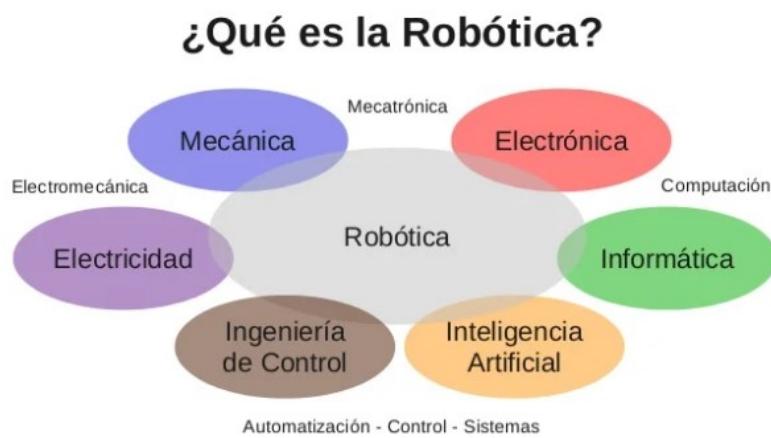


Figura 1.1: Disciplinas que componen la robótica.

Con los recientes avances en mecatrónica, informática e inteligencia artificial, la robótica ha encontrado su lugar en una amplia gama de sectores. En el sector industrial, los brazos robóticos desempeñan roles cruciales en cadenas de montaje, automatizando y refinando diversos procesos. Paralelamente, en el sector doméstico, la robótica ha transformado nuestras rutinas diarias: desde aspiradoras inteligentes que se desplazan

con precisión por nuestros hogares, hasta avanzados robots de cocina que simplifican la preparación de alimentos.

1.2. Los robots móviles

Los robots, a lo largo de su evolución, han sido clasificados de diversas maneras en función de su diseño, propósito y contexto de aplicación. Los robots humanoides, con su semejanza a la figura humana, buscan emular nuestros movimientos y comportamientos para adaptarse a nuestro mundo. Existen también robots colaborativos que, en lugar de reemplazar a los humanos, están diseñados para trabajar junto a nosotros en entornos compartidos. También podemos distinguir los ya mencionados robots industriales, sin embargo y a pesar de esta diversidad, existe una clasificación que destaca sobre el resto, debido a su gran importancia en la historia de la robótica y a su continuo desarrollo, estos son los robots móviles. Un robot móvil es un sistema robótico que puede desplazarse en distintos entornos y que cuenta con distintas capacidades que les permiten ejecutar tareas complejas, ya sea de forma autónoma o controlados por un operador humano. [2]

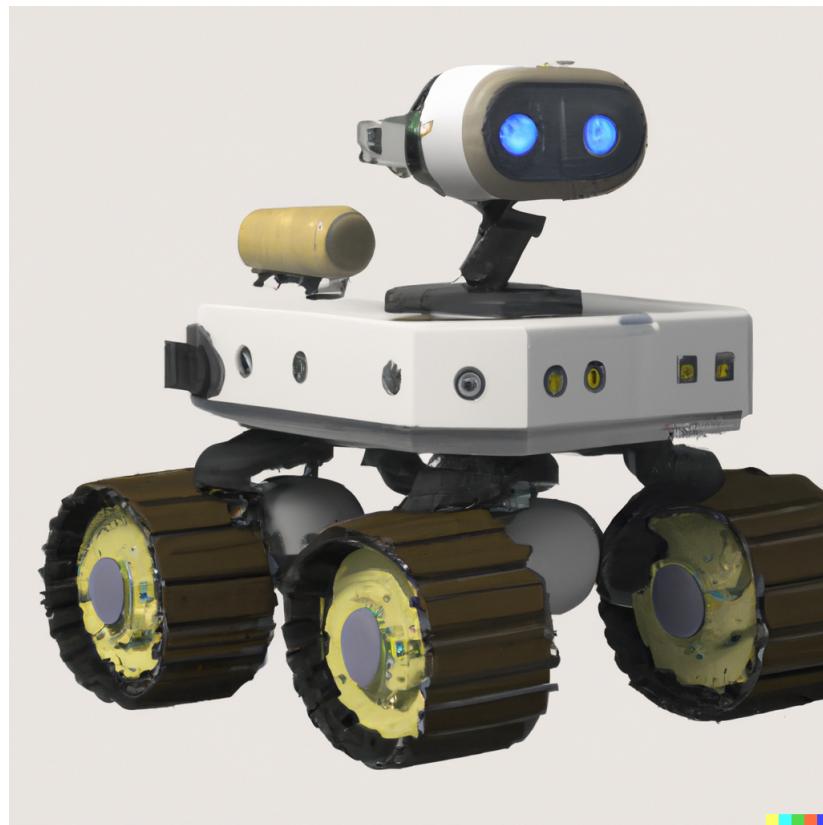


Figura 1.2: Ilustración de un robot móvil generado por IA.

A diferencia de los robots fijos, que permanecen estacionarios y realizan tareas desde una posición establecida, los robots móviles cuentan con la capacidad de desplazarse de un sitio a otro. Esto les otorga una libertad sin precedentes y les permite realizar todo tipo de acciones que para muchas otras máquinas resultan imposibles. Esta versatilidad se debe, en gran parte, a avanzados sistemas de sensores que les permiten percibir su entorno; algoritmos de navegación y control que delinean sus trayectorias; sistemas de comunicación que los conectan con otras máquinas, bases de datos y teleoperadores; y a sofisticados actuadores, tales como ruedas, patas, hélices y un largo etcétera, en función de a qué medios deba adaptarse el robot.

En el panorama de la robótica móvil, a pesar de la diversidad y versatilidad de sus aplicaciones, una categoría ha destacado del resto. Los vehículos autónomos son, probablemente, los protagonistas de la robótica móvil del siglo XXI. Estos robots son vehículos equipados con sofisticados sensores que les permiten percibir su entorno y reaccionar ante él de manera inteligente, imitando el comportamiento humano. Estos vehículos consiguen esta gran hazaña gracias a una característica muy importante: la conducción autónoma.

1.3. La conducción autónoma

La conducción, en su esencia, se refiere a la acción de guiar o controlar un vehículo, ya sea motorizado o no, con la finalidad de trasladarse de un lugar a otro. Desde tiempos prehistóricos, la humanidad ha tenido la necesidad de trasladarse y transportar bienes, materias primas y otras personas. Esta necesidad impulsó la creación de vehículos sencillos como carros tirados por animales o vehículos impulsados por la propia potencia muscular del conductor, como las bicicletas.

Con el paso del tiempo y el avance de la ingeniería y la ciencia en el mundo de la automoción, en el siglo XIX aparecieron los primeros vehículos motorizados. Estos prototipos, movidos inicialmente por vapor y luego por combustibles fósiles, marcaron el inicio de una revolución en la movilidad y transformaron la manera en que las personas y mercancías se desplazaban. Sin embargo, estos vehículos requerían determinadas habilidades manuales y cognitivas por parte del conductor, además de amplios conocimientos de la máquina que se operaba. Así, la conducción se convirtió en una habilidad que las personas debían estudiar, practicar y aprender. Adicionalmente, el acto de conducir, para ser ejecutado de manera correcta y segura, requiere de atención, calma y claridad mental, estados que en ocasiones resultan difíciles de

mantener para los seres humanos, sobre todo en situaciones desconocidas, inciertas y estresantes, situaciones que son el pan de cada día de cualquier conductor. Todo esto ha hecho que la conducción sea una de las habilidades más difíciles de adquirir y a la vez más valoradas en la actualidad.

Debido a esto, la idea de vehículos que pudieran conducirse por sí mismos, sin necesidad de intervención humana y de las habilidades y atención del conductor, ha sido una aspiración de la humanidad por mucho tiempo, muy probablemente desde el inicio mismo de la conducción. Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XX cuando esta idea empezó a parecer viable. Durante este período, la emergencia de la computación, la inteligencia artificial y una amplia gama de sensores avanzados resultaron en vehículos capaces de interpretar su entorno, tomar decisiones y operar sin intervención humana directa en ciertas condiciones estableciendo así el inicio de la conducción autónoma. La conducción autónoma se define como la capacidad total o parcial de que un vehículo pueda conducir autonomamente sin necesidad de un operador externo.

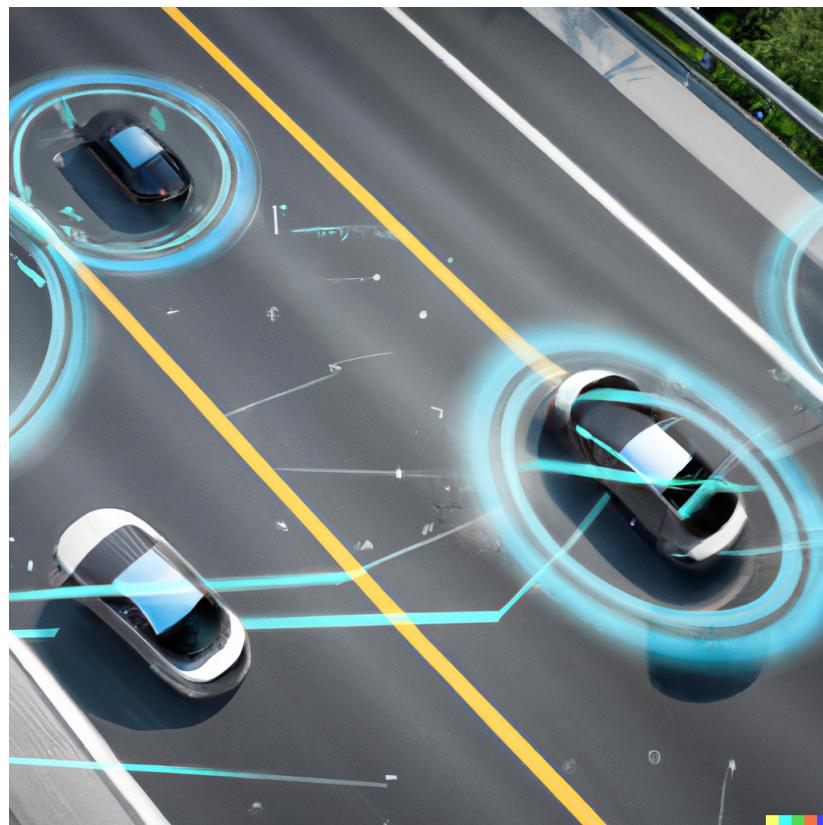


Figura 1.3: Ilustración de coches autónomos generada por IA.

Existen 6 niveles de conducción autónoma según el estándar establecido por la *Sociedad de ingenieros automotrices* (SAE) en el estándar J3016 [3]

1. Nivel 0 (No Automation):

- El conductor humano es responsable de todas las tareas de conducción, incluso si el vehículo ofrece alguna intervención momentánea.

2. Nivel 1 (Driver Assistance):

- El vehículo puede asistir al conductor en una única tarea de conducción (por ejemplo, control de crucero).
- El conductor sigue siendo responsable de la mayoría de las tareas y debe estar atento en todo momento.

3. Nivel 2 (Partial Automation):

- El vehículo puede controlar simultáneamente dos tareas, como dirección y aceleración.
- A pesar de esta automatización, el conductor debe supervisar el sistema en todo momento.

4. Nivel 3 (Conditional Automation):

- El vehículo puede realizar la mayoría de las tareas de conducción en ciertas condiciones, pero requerirá intervención humana cuando el sistema lo solicite.
- El conductor debe estar disponible para tomar el control, pero no necesita tener las manos en el volante todo el tiempo.

5. Nivel 4 (High Automation):

- En ciertos escenarios o zonas geográficas específicas, el vehículo puede manejar todas las tareas de conducción.
- Fuera de estas zonas, el vehículo podría requerir que el conductor tome el control.

6. Nivel 5 (Full Automation):

- El vehículo es completamente autónomo en todos los escenarios y condiciones.
- No necesita un volante, pedales ni un conductor humano.

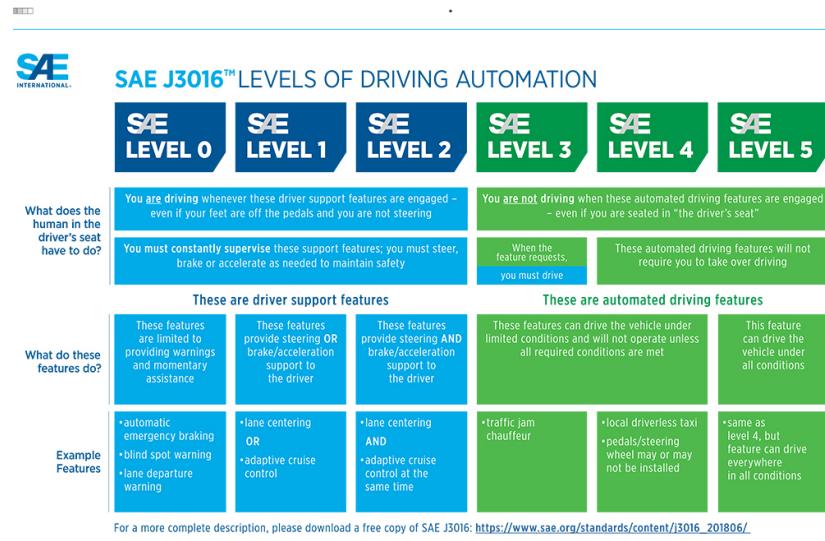


Figura 1.4: Niveles de conducción autónoma según el estándar J3016.

El final del siglo XX y el comienzo del siglo XXI marcaron una era significativa en el avance de la conducción autónoma. Los primeros sistemas y algoritmos para la conducción autónoma derivaban de los sistemas *Sistemas avanzados de ayuda a la conducción* (ADAS). Estos sistemas representan un conjunto de tecnologías integradas en vehículos que no solo mejoran la seguridad sino también la experiencia del conductor. Operan con diferentes grados de autonomía y pueden influir en múltiples funciones del vehículo, como frenado, aceleración, dirección y señalización. Por ejemplo, sistemas como el *Asistente inteligente de velocidad* (ISA), que regula constantemente la velocidad del vehículo; el *Sistema detector de marcha atrás* (REV), que alerta sobre obstáculos al retroceder; y el *Sistema de mantenimiento de carril* (LKA), que asegura que el vehículo permanezca dentro de un carril, sitúan a los coches que los incorporan dentro de los primeros tres niveles de autonomía. No obstante, con el auge de la inteligencia artificial, la emergencia de las redes neuronales y los avances en computación, los sistemas ADAS han evolucionado con rapidez. Este progreso ha permitido a empresas como Tesla y Waymo desarrollar los primeros vehículos que rozan el nivel 4 de autonomía.



Figura 1.5: Vehículo tesla.

Sin embargo, a pesar de todos los avances de los últimos años en el ámbito de la conducción autónoma, esta problemática sigue sin estar completamente solucionada y los vehículos de nivel 5 de autonomía todavía son solo prototipos y no productos comerciales certificados y testados. Esto se debe a que la conducción autónoma es una de las áreas más desafiantes dentro de la ingeniería y la robótica, dada la inmensa complejidad y variabilidad de los escenarios en los que estos vehículos deben operar. Estos entornos no son estáticos, sino que están en constante cambio y movimiento. Carreteras en constante transformación, condiciones meteorológicas cambiantes, variaciones de luz, obstáculos inesperados y una amplia variedad de usuarios de la vía, desde peatones hasta ciclistas y otros vehículos, hacen que la carretera sea uno de los entornos más impredecibles. Añadiendo una capa adicional de complejidad, se encuentra el factor humano. No solo los vehículos autónomos deben anticipar y responder a las acciones de los conductores humanos, que pueden ser a menudo ilógicas o imprevistas, sino que además deben garantizar la máxima seguridad para los peatones y otros usuarios de la vía. Convivir en un espacio compartido con seres humanos requiere de un cuidado y precisión extraordinarios, pues el más mínimo error podría tener consecuencias extremadamente graves.

No obstante, una conducción autónoma perfecta promete revolucionar radicalmente el paradigma de movilidad y seguridad en nuestras carreteras. La mayoría de los accidentes en la carretera son causados por errores humanos, ya sea por distracción, fatiga o decisiones erróneas en situaciones críticas. Los vehículos autónomos, operando con una combinación de sensores avanzados y algoritmos sofisticados, tienen el potencial de minimizar estos errores, reaccionando más rápidamente y de manera más precisa que un humano ante situaciones imprevistas. Además, los sistemas de conducción autónoma

podrían gestionar de forma más eficiente el flujo de tráfico. Al poder comunicarse entre sí, los vehículos podrían coordinarse para evitar atascos, optimizar el uso de carriles y reducir las congestiones, resultando en viajes más rápidos y eficientes para todos. Por último, pero no menos importante, liberar a los humanos de la tarea de conducir abre un mundo de posibilidades. Las personas podrían ocupar todo el tiempo que dedicamos hoy en día a la conducción en otras acciones más provechosas o entretenidas: leer, ver una película, trabajar o incluso descansar. Esto mejoraría la calidad de vida al proporcionar tiempo adicional para actividades personales o productivas. En definitiva, las ventajas que nos presenta la conducción autónoma son múltiples y muy interesantes; es una tecnología que, sin duda, cambiará el mundo.

1.4. La inteligencia artificial en la conducción autónoma

La IA ha desempeñado un papel fundamental en la evolución de la conducción autónoma, permitiendo que los vehículos interpreten su entorno, tomen decisiones y se adapten a situaciones cambiantes. Al principio, la IA en la conducción autónoma se basaba en algoritmos más básicos. Sin embargo, pronto se hizo evidente que para alcanzar los niveles más altos de autonomía era necesario un enfoque más sofisticado para gestionar la complejidad. Esto condujo a la adopción y desarrollo de técnicas más avanzadas.

Las redes neuronales se han convertido en herramientas esenciales en el campo de la conducción autónoma. Estas redes, que imitan la estructura y el funcionamiento de las neuronas humanas, son particularmente aptas para tareas como la detección y la identificación de objetos. Al ser entrenadas con grandes cantidades de datos, pueden reconocer patrones y categorizar objetos en tiempo real con una precisión impresionante.

El aprendizaje por refuerzo es otra técnica de IA crucial en la conducción autónoma. Este método entrena modelos de IA a través de recompensas y penalizaciones, permitiéndoles aprender a tomar decisiones óptimas en situaciones específicas. Por ejemplo, un vehículo autónomo podría ser recompensado por evitar obstáculos y penalizado por acercarse demasiado a ellos, aprendiendo con el tiempo a navegar de manera más segura y eficiente.

El imitation learning, o aprendizaje por imitación, es una técnica que permite a los sistemas de IA aprender a partir de la observación directa de acciones realizadas por humanos u otros agentes. En el contexto de la conducción autónoma, se puede utilizar

para enseñar a los vehículos a imitar las decisiones y acciones de conductores humanos experimentados en diversas situaciones, permitiendo que los vehículos aprendan comportamientos más naturales y adaptativos.

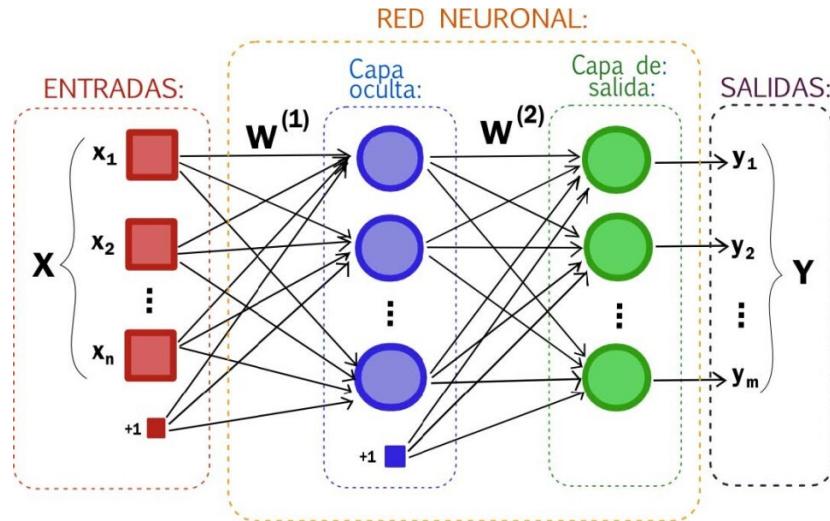


Figura 1.6: Ilustración de una red neuronal.

En resumen, la inteligencia artificial ha revolucionado significativamente el ámbito de la conducción autónoma. Las principales empresas tecnológicas y automotrices, como Waymo, Tesla y Cruise, han desarrollado y probado vehículos con niveles avanzados de autonomía, principalmente en niveles 2 y 3, y en algunos casos con capacidades limitadas de nivel 4 en entornos específicos. A pesar de los logros técnicos, la complejidad que representa navegar por nuestras carreteras sitúa aún lejos vehículos capaces de alcanzar niveles 4 y 5 completos de autonomía.

1.5. Conducción autónoma en CARLA basada en aprendizaje por refuerzo

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) que a continuación se presenta aborda una profunda investigación académica sobre la conducción autónoma basada en aprendizaje por refuerzo. Primero, se explorarán distintas soluciones de conducción autónoma basadas en métodos más tradicionales. A pesar de no ser los algoritmos más punteros y avanzados a día de hoy, han sido fundamentales en los primeros desarrollos de vehículos autónomos y siguen siendo relevantes en ciertas aplicaciones específicas. Posteriormente, se explorarán soluciones adicionales para el problema de la conducción autónoma; pero en este caso, impulsadas por la inteligencia artificial utilizando *Deep learning* (DL) y *Reinforcement learning* (RL). Finalmente, tras exponer todos los enfoques, se extraerán datos con los cuales se elaborarán gráficas y se realizará un

análisis detallado que resaltará las fortalezas y debilidades de cada técnica en distintas situaciones y contextos de conducción.

Finalmente, el TFG concluirá con la creación de un sistema avanzado de conducción autónoma aprovechando las técnicas de inteligencia artificial estudiadas. Este sistema estará especialmente diseñado para seguir carriles, evitar obstáculos y adaptarse al tráfico de la vía, garantizando una conducción segura y correcta.

Capítulo 2

Objetivos

En el primer capítulo, se ha descrito e introducido el contexto en el que se enmarca este trabajo de fin de grado. En este segundo capítulo, que a continuación se expone, se procederá a exponer los objetivos específicos que se han establecido para este proyecto.

2.1. Descripción del problema

Como se ha mencionado en el primer capítulo, la conducción autónoma promete ser un avance tecnológico que cambie completamente la manera en la que se concibe la movilidad en nuestra sociedad. Este trabajo de fin de grado tiene como principal objetivo realizar una investigación exhaustiva sobre la utilización de distintas técnicas de inteligencia artificial, como son el deep learning y el aprendizaje por refuerzo, para la creación de una solución completa para la problemática de la navegación por un carril. Se presentará un vehículo capaz de seguir un carril, adaptarse al tráfico de este y evitar colisiones en caso de que el tráfico se detenga.

2.2. Objetivos

1. Instalación y configuración del simulador CARLA, ROS2 y el carla to ros bridge, logrando una comunicación entre ambos en un entorno vacío.
2. Creación de un comportamiento sigue carril autónomo basado en RL y DL.
3. Por medio de RL, desarrollar un comportamiento para, además de navegar por un carril, detenerse antes de colisionar con obstáculos de la carretera.
4. Elaboración de un comportamiento que permita a un vehículo adaptarse a la velocidad del tráfico a la hora de navegar por un carril utilizando RL.
5. Finalmente, obtención de métricas de cada método anteriormente mencionado y realización de una comparativa entre estas métricas, presentando una conclusión final.

2.3. Requisitos

Los requisitos que ha de cumplir este trabajo son los siguientes:

- El trabajo ha de realizarse en el simulador fotorealista de conducción autónoma CARLA.
- Los sistemas a desarrollar deben ser reactivos.
- Los sistemas a desarrollar deben funcionar en *Real time* (RT).
- El vehículo debe navegar de manera adecuada, natural y segura.

2.4. Metodología

El Trabajo Fin de Grado (TFG) comenzó en octubre de 2022 y finalizó en septiembre de 2023. A lo largo de estos 11 meses se siguieron las siguientes directrices para la realización del mismo:

- Reuniones semanales con mi tutor de TFG para establecer micro-objetivos semanales y reales. Gracias a estas reuniones, fue fácil mantener un control del avance del proyecto en cada momento e ir solucionando de manera rápida y efectiva los problemas que surgían.
- Realización de un blog¹, en el que se añadían periódicamente entradas con información sobre el avance del proyecto, además de los problemas enfrentados en cada etapa, a modo de bitácora para documentar todo el proceso de desarrollo.
- Se utilizó la plataforma de comunicación Microsoft Teams para realizar las reuniones periódicas con mi tutor del TFG y el correo de la universidad para mantener contacto con él en todo momento, con el fin de resolver problemas que pudieran surgir, notificar avances y solicitar consejos.
- Se empleó la plataforma de desarrollo GitHub para alojar todo el código desarrollado en el TFG².
- En el desarrollo de este TFG, se adoptó la metodología Scrum como sistema de trabajo. A lo largo del desarrollo de este trabajo, se establecieron diferentes sprints, cada uno de ellos con una duración determinada, durante los cuales se

¹<https://roboticslaburjc.github.io/2022-tfg-juancamilo-carmona/>

²<https://github.com/RoboticsLabURJC/2022-tfg-juancamilo-carmona>

plantearon mini objetivos específicos a alcanzar. Esta estructura no solo permitió una organización y planificación eficiente del trabajo, sino que también ofreció la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios y nuevos requerimientos que surgieron a lo largo del desarrollo del TFG.

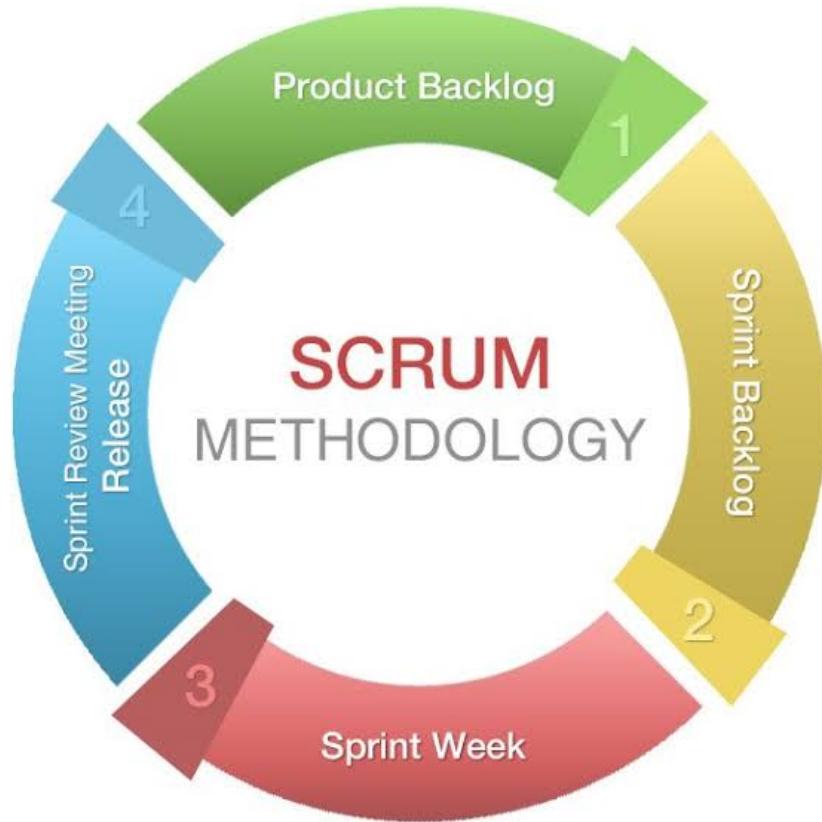


Figura 2.1: Ilustración de la metodología scrum.

2.5. Plan de trabajo

Durante los 11 meses en los que se ha desarrollado este proyecto, se ha seguido un plan de trabajo con la siguiente estructura:

1. Etapa de configuración: Esta etapa consistió básicamente en preparar todo el entorno para la realización del TFG. Aquí se instalaron todos los drivers, software y aplicaciones necesarias para empezar a trabajar.
2. Comienzo del TFG: Una vez el entorno de trabajo estaba listo, se empezó a desarrollar todo el código.
 - En primer lugar, se inició con el código de un teleoperador sencillo de un vehículo.

- En segunda instancia, una vez el teleoperador estaba terminado, se continuó con los algoritmos de seguimiento de carriles basados en visión artificial tradicional.
 - El siguiente paso después de explorar métodos más tradicionales, fue programar un sigue carriles basado en DL y RL.
 - Una vez terminado el comportamiento sigue carriles, se procedió a añadir un comportamiento el cual permitiera no chocarse al encontrar obstáculos en la carretera.
 - Finalmente se trabajó en una solución completa de conducción autónoma que se adaptara al tráfico, navegando por el carril correctamente, deteniéndose en caso de encontrar un vehículo detenido u obstáculo y adaptándose a la velocidad del tráfico sin colisionar ni detenerse en caso de que este existiera.
3. Una vez finalizado el código, la siguiente etapa consistió en analizar las métricas de todos los algoritmos y compararlas para llegar a una conclusión sobre la mejor solución para la problemática.
 4. Para finalizar, se procedió a la redacción de la memoria del Trabajo Fin de Grado.

Bibliografía

- [1] Wikipedia. La robótica. <https://es.wikipedia.org/wiki/Robot>.
- [2] Angel Eduardo Gil Pérez. Robótica móvil: Qué es y sus aplicaciones. <https://openwebinars.net/blog/robotica-movil-que-es-y-sus-aplicaciones/>.
- [3] Sae standards news: J3016 automated-driving graphic update. SAE Internacional, 2019.
- [4] Conducción autónoma — niveles y tecnología. <https://www.km77.com/reportajes/varios/conduccion-autonoma-niveles>.