



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

*Juan Camilo Carmona Sánchez*

# 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*

**ROS** *Robot operating system*

**TFM** *Trabajo de fin de máster*

# Índice general

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
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 . . . . .	9
1.5. Conducción autónoma en CARLA basada en aprendizaje por refuerzo . . . . .	10
<b>2. Objetivos</b>	<b>11</b>
2.1. Descripción del problema . . . . .	11
2.2. Objetivos . . . . .	11
2.3. Requisitos . . . . .	12
2.4. Metodología . . . . .	12
2.5. Plan de trabajo . . . . .	13
<b>3. Plataformas de desarrollo y herramientas utilizadas</b>	<b>15</b>
3.1. Lenguajes de programación . . . . .	15
3.1.1. Python . . . . .	15
3.2. Entornos de programación . . . . .	16
3.2.1. CARLA . . . . .	16
3.2.2. Ros2 . . . . .	17
3.2.3. CARLA to ros bridge . . . . .	18
3.2.4. Visual studio code . . . . .	19
3.2.5. Servidor landau de la URJC . . . . .	20
3.3. Herramientas de inteligencia artificial . . . . .	21
3.3.1. Redes neuronales . . . . .	21
3.3.2. Aprendizaje por refuerzo . . . . .	22
<b>Bibliografía</b>	<b>23</b>

# 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.	Interior de un robotaxi de Waymo . . . . .	7
1.7.	Ilustración de una red neuronal . . . . .	10
2.1.	Ilustración de la metodología scrum . . . . .	13
3.1.	Imagén de vehículos en CARLA . . . . .	17
3.2.	logotipo de Ros2 . . . . .	18
3.3.	carla to ros bridge . . . . .	19
3.4.	carla to ros bridge . . . . .	19

# Listado de códigos

---

3.1. Hola Mundo en Python . . . . .	15
-------------------------------------	----

# 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]

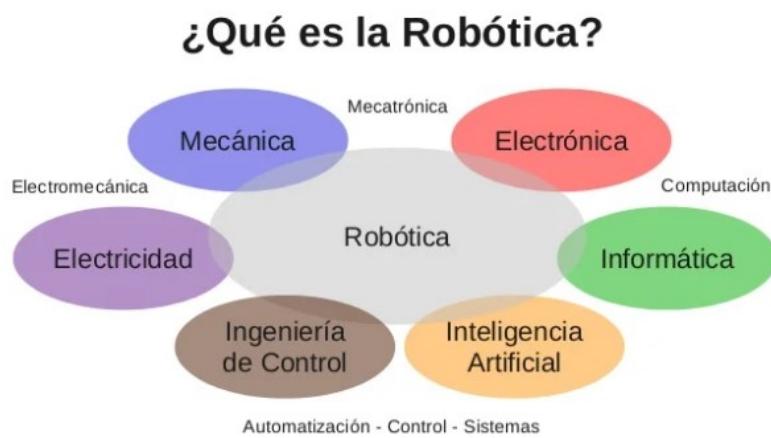


Figura 1.1: Disciplinas que componen la robótica.

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]

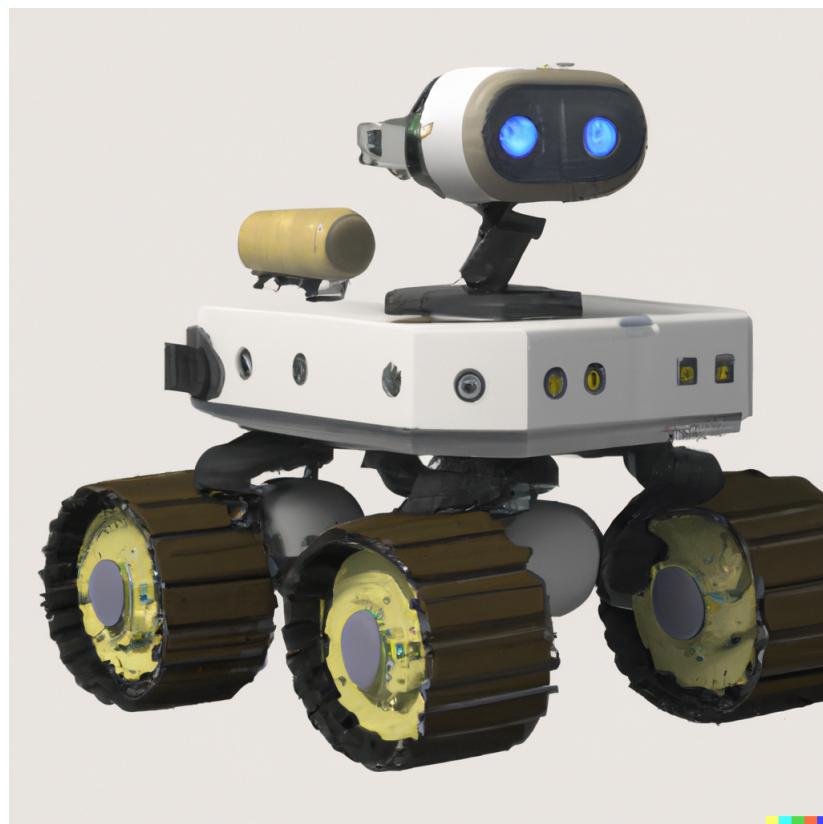


Figura 1.2: Ilustración de un robot móvil generado por IA.

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, procesar esa información mediante algoritmos avanzados para 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. [? ]

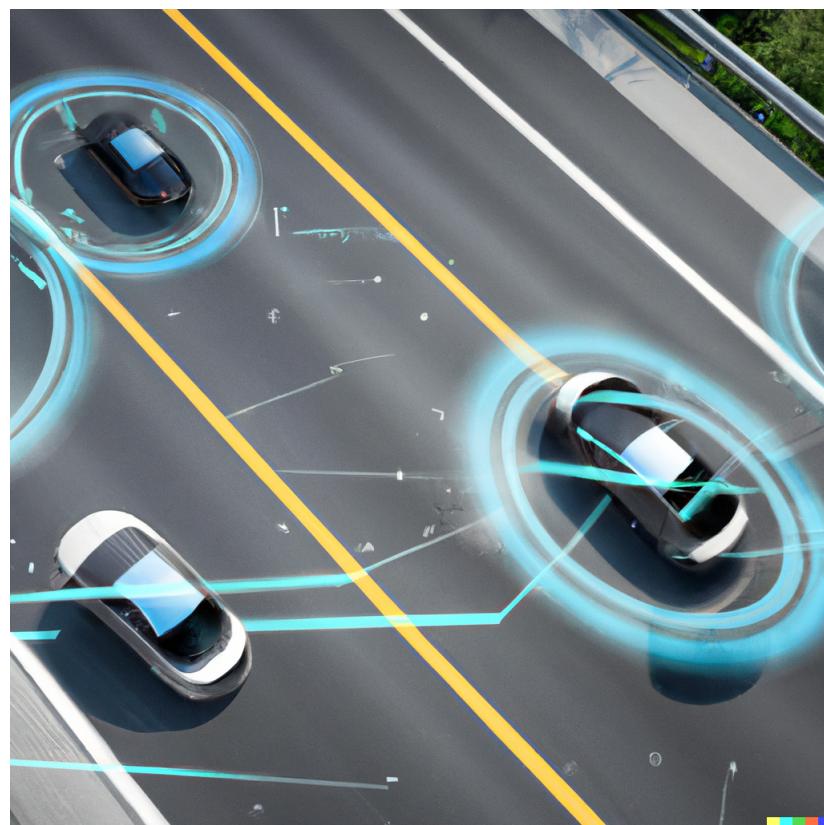


Figura 1.3: Ilustración de coches autónomos generada por IA.

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.

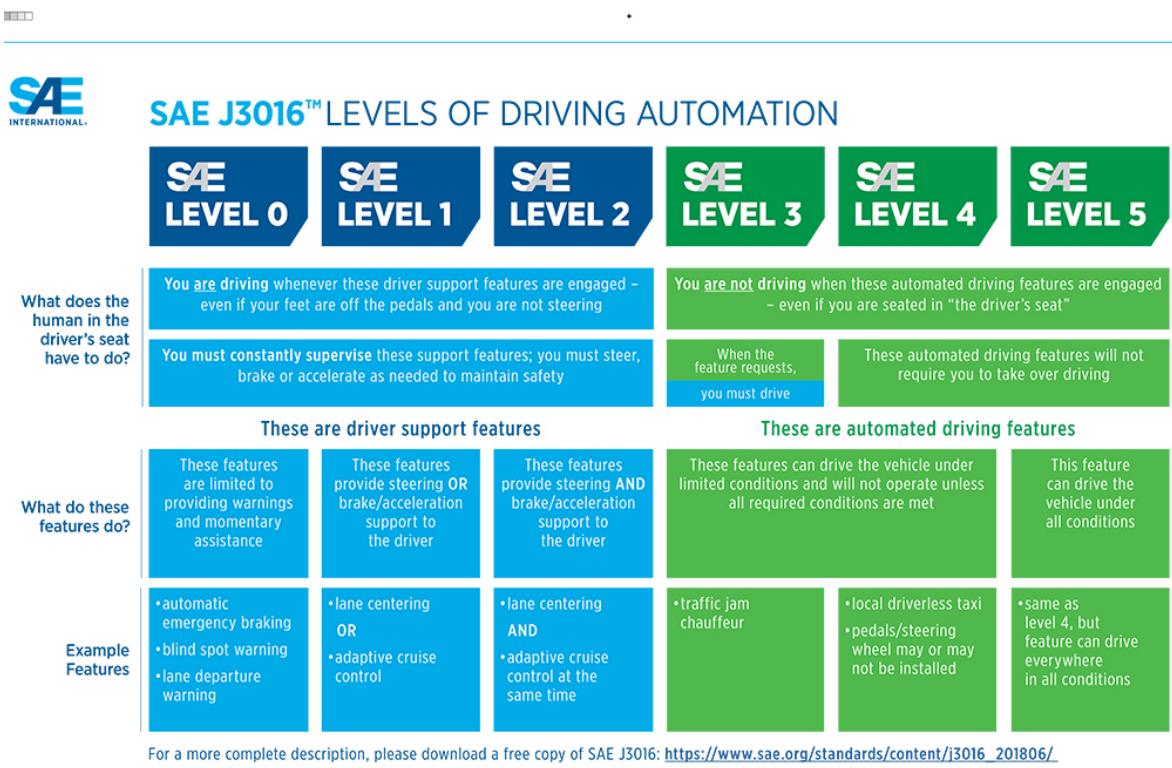


Figura 1.4: Niveles de conducción autónoma según el estándar J3016.

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). Según la página oficial de la DGT [4] 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 2 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 desarrollar los primeros vehículos comerciales de nivel 2. En cuanto a los niveles de autonomía más avanzados tenemos a compañías como Waymo, quien como se explica en ese artículo académico [5] está embarcado en un proyecto para crear una flota de taxis autónomos.



Figura 1.5: Vehículo tesla.

Los llamados robotaxis [6] , son actualmente una serie de prototipos de taxis autónomos de nivel de autonomía 4 que operan en algunas ciudades de Estados Unidos. Estos vehículos estan pensados para transportar pasajeros de manera completamente autónoma, sin la necesidad de un conductor humano, de hecho estos taxis futuristas no incluyen pedales ni volante como se puede observar en la figura 1.6. Los robotaxis actualmente aún son prototipo que realizan viajes con pasajeros reales seleccionados en algunas zonas de Phoenix y San Francisco con el fin de recopilar datos y en general probar y madurar esta nueva tecnologia para así en un futuro próximo convertir los robotaxis en un producto comercial que revolucione el transporte en las ciudades



Figura 1.6: Interior de un robotaxi de Waymo.

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 4 y 5 de autonomía todavía son solo prototipos y no productos comerciales certificados y testados como podemos leer en este TFM [7]. 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 como se menciona en este artículo académico en la revista nature [8]

No obstante, una conducción autónoma perfecta promete revolucionar radicalmente el paradigma de movilidad y seguridad en nuestras carreteras tal y como explica este artículo publicado en la revista ScienceDirect [9]. 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 aparte. 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 como se muestra en el siguiente TFG de un estudiante de la universidad de ULPCC [10]

**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. En la documentación de continuación se puede encontrar información más detallada sobre el aprendizaje por refuerzo [11]

**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. En el *Trabajo de fin de máster* (TFM) que a continuación se cita se explora una solución para la conducción autónoma basada en imitation learning [12].

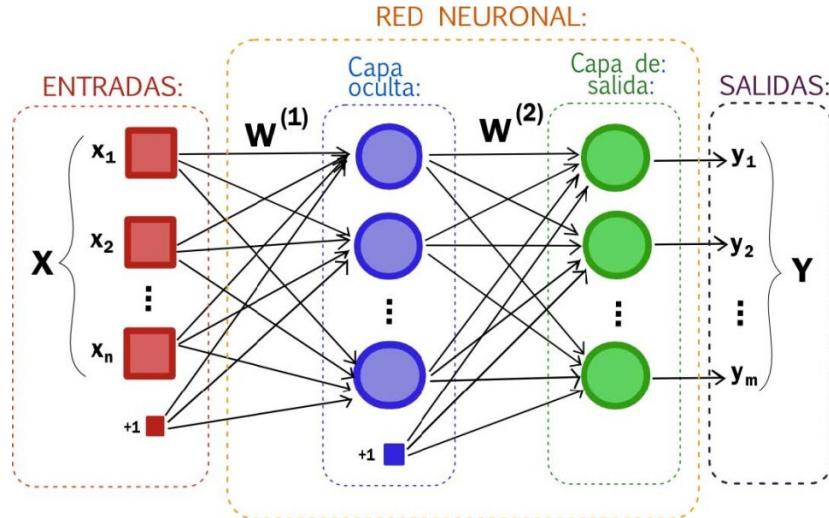


Figura 1.7: Ilustración de una red neuronal.

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. Se pretende solucionar varias problemáticas relacionadas con el seguimiento de carriles por un vehículo autónomo de manera fluida, elegante y segura. Por otro lado, aparte de este hito este Trabajo Fin de Grado (TFG) pretende llegar un paso mas allá mejorando este sistema y otorgandole la capacidad de evitar la colisión frontal con obstáculos que puedas aparecer en la carretera.

Finalmente, el TFG concluirá con la creación de un sistema incluso más avanzado de conducción autónoma aprovechando técnicas de inteligencia artificial. Este sistema estará especialmente diseñado para seguir carriles, evitar obstáculos y adaptarse al tráfico presente en la vía.

---

## **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 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 comportamiento dotado de la capacidad 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, logrando además una comunicación entre ambos.
2. Creación de un comportamiento sigue carril autónomo basado en *Reinforcement learning* (RL) y *Deep learning* (DL).
3. 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. Análisis de métricas de cada método anteriormente mencionado y realización de una comparativa entre estas métricas.

## 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, es decir deben ser capaces de reaccionar a su entorno de manera rápida y precisa.
- El vehículo debe navegar de manera adecuada, natural y segura.

## 2.4. Metodología

El 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 blog<sup>1</sup>, 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 TFG<sup>2</sup>.
- 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 plantearon mini objetivos específicos a alcanzar. Esta estructura no solo permitió una organización y planificación eficiente del trabajo, sino que también ofreció

---

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

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

la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios y nuevos requerimientos que surgieron a lo largo del desarrollo del TFG.

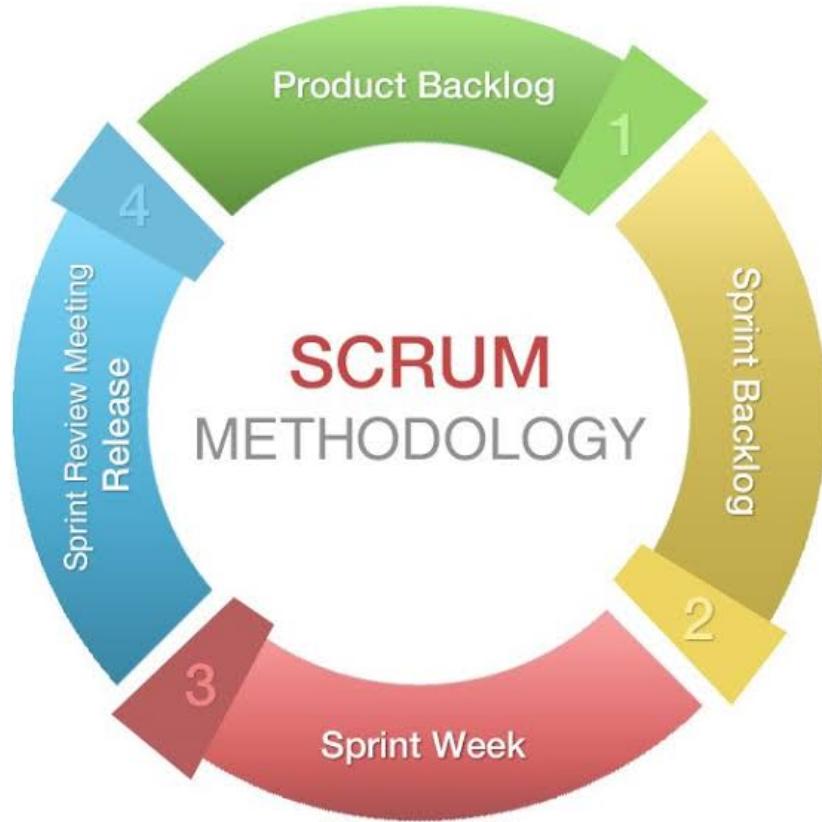


Figura 2.1: Ilustración de la metodología scrum.

## 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 desarrollo 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 carril basado en DL y RL.
  - Una vez terminado el comportamiento sigue carril, 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 desarrollo, 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.

---

## Capítulo 3

# Plataformas de desarrollo y herramientas utilizadas

---

En el capítulo que a continuación se presenta se van a describir las distintas plataformas y herramientas que se han utilizado a lo largo del desarrollo de este TFG.

### 3.1. Lenguajes de programación

#### 3.1.1. Python

Python es un lenguaje de programación orientado a objetos, de alto nivel y fácil de interpretar, con una sintaxis sencilla y legible [13]. Actualmente, es uno de los lenguajes de programación más populares y resulta especialmente útil para el desarrollo de prototipos. Esto se debe a su facilidad de uso, que permite codificar algoritmos complejos de manera rápida y ágil. Además, es muy utilizado para desarrollar aplicaciones y algoritmos de inteligencia artificial, gracias a la gran cantidad de bibliotecas especializadas que este lenguaje ofrece [14]. Todo el código desarrollado para este TFG ha sido realizado íntegramente en Python, lo cual ha facilitado enormemente tanto la fase de investigación como la de implementación, permitiéndonos centrarnos más en la lógica de los algoritmos y menos en las complicaciones del lenguaje en sí. Esta elección ha demostrado ser acertada y ha contribuido significativamente al éxito del proyecto.

---

```
print("Hola Mundo")
```

---

Código 3.1: Hola Mundo en Python

## 3.2. Entornos de programación

### 3.2.1. CARLA

Dentro del extenso panorama de simuladores dedicados a la conducción autónoma, encontramos un sinfín de opciones. Sin embargo, entre toda esta variedad de simuladores, CARLA destaca como una de las herramientas más interesantes. CARLA es un simulador de conducción autónoma realista de código abierto que ha ganado prominencia en la comunidad de investigación y desarrollo, su alto grado de fotorealismo, el amplio control que ofrece sobre el entorno simulado y la gran cantidad de vehículos y sensores disponibles la convierten en una de las mejores elecciones a la hora de desarrollar y probar todo tipo de proyectos relacionados con la conducción autónoma. Fue creado por el equipo del Computer Vision Center en Barcelona en colaboración con Intel Labs y Toyota Research Institute. Desde su lanzamiento en 2017, CARLA ha sido una de las herramientas más prometedoras del mundo de la conducción autónoma.

La principal y más importante fortaleza de este simulador probablemente sea su nivel de fotorealismo. CARLA ofrece un alto nivel de detalle y precisión en sus simulaciones, que garantiza que los desarrolladores puedan probar algoritmos en condiciones que emulan fielmente situaciones del mundo real, como cambios de luz y de sombras, choques y colisiones, situaciones de altas y bajas velocidades, entre muchas otras características que sitúan a este simulador un paso por delante en cuanto a este aspecto se refiere se refiere.

Otra de las fortalezas más destacables de CARLA es su elevado número de escenarios. Estos abarcan desde entornos urbanos, como calles de barrios, rotundas, etc., hasta entornos interurbanos como autopistas y carreteras convencionales e incluso entornos rurales como granjas. Esto nos permite a los ingenieros y desarrolladores simular innumerables contextos y situaciones de conducción. Adicionalmente, CARLA brinda gran control sobre las condiciones ambientales. Los usuarios tienen la ventaja de ajustar aspectos tan vitales como la luminosidad, hora del día y condiciones climáticas, creando un espacio flexible y diverso para pruebas y experimentos especialmente aquellos relacionados con la IA.

La diversidad de activos probablemente sea la última de las fortalezas de CARLA. Su biblioteca contiene una amplia gama de vehículos, peatones y sensores, abarcando desde cámaras RGB hasta sistemas LIDAR, radares y electroópticos, ofreciendo así una rica paleta de herramientas para las simulaciones.



Figura 3.1: Imagén de vehículos en CARLA

CARLA es el corazón de este TFG es el escenario virtual en el que se desarrollan, prueban y evalúan todos los algoritmos y modelos diseñados para las problemáticas de conducción autónoma planteadas.<sup>1</sup>

### 3.2.2. Ros2

ROS2, la evolución de segunda generación de ROS, es un meta sistema operativo de código abierto diseñado específicamente para ser utilizado en robots. Proporciona servicios que se esperarían de un sistema operativo, incluyendo abstracción de hardware, control de dispositivos de bajo nivel e implementación de funcionalidades [15]. Una de las características fundamentales de ROS es su modelo de comunicación basado en el sistema publicador-suscriptor. En este sistema, los nodos (componentes individuales de software en un sistema ROS) pueden comunicarse entre sí de manera asincrónica. Un nodo que tiene información para compartir se convierte en un publicador y envía mensajes a un topic. Otros nodos que estén interesados en recibir esa información se suscriben a ese y recibirán los mensajes publicados en él. Esto permite una comunicación eficiente y flexible entre los diferentes nodos que conformen nuestro sistema.

---

<sup>1</sup><https://carla.org/>

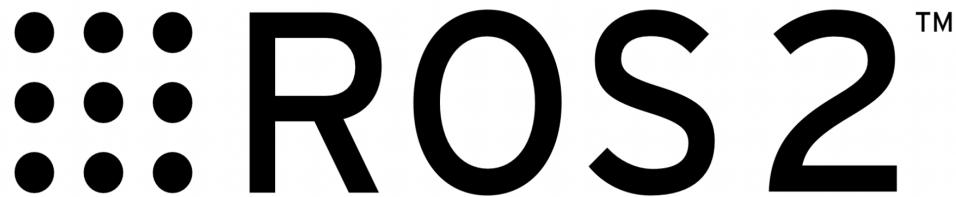


Figura 3.2: Logotipo de Ros2

En el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, ROS 2 se utilizó para elaborar una sección específica del código y de los algoritmos de conducción autónoma. La decisión de integrar ROS 2 con el simulador CARLA tuvo un propósito muy claro: evaluar la viabilidad de unir las capacidades de este sistema, que es una referencia en el mundo de la robótica, con el entorno de simulación de conducción autónoma que CARLA ofrece. Esta integración se realizó con el objetivo de no solo generar algoritmos más robustos y eficaces sino también de explorar nuevas posibilidades y métodos para la creación de sistemas de conducción autónoma. Esta fusión entre ROS 2 y CARLA se convirtió en un elemento clave para entender y desarrollar más a fondo los complejos retos que plantea la conducción autónoma, permitiendo una interacción más fluida y adaptable entre los diferentes componentes del sistema.<sup>2</sup>

### 3.2.3. CARLA to ros bridge

Carla to ros brisge es una herramienta oficial desarrollada por el equipo de CARLA. Esta herramienta tiene el objetivo de ser, un medio de comunicación bidireccional entre CARLA y un entorno de desarrollo ROS o ROS2. Por un lado el bridge se encarga de traducir la información de CARLA a topics y mensajes de ROS de manera que el framework pueda entenderlos sin mayor dificultad. Por otro lado el bridge se encarga también de traducir los mensajes publicados en los topics generados para CARLA en mensajes basados en la API del simulador para que, de esta manera un nodo ROS pueda comunicarse con CARLA como lo haría con cualquier robot. carla to ros bridge puede ser encontrado de su repositorio oficial de github, en el aparte del código encontraremos intrucciones para su descarga y uso<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup><https://www.ros.org/>

<sup>3</sup><https://github.com/carla-simulator/ros-bridge>

## carla-simulator/ros-bridge

ROS bridge for CARLA Simulator



41

Contributors

98

Issues

377

Stars

287

Forks



Figura 3.3: carla to ros bridge

en este este TFG carla to ros bridge ha tenido un papel fundamental en la fase de investigación y experimentación sobre la viabilidad del desarrollo de algoritmos de conducción autónoma en ROS2 para el simulador CARLA, permitiendo que CARLA y ROS2 se comunicarán y haciendo posible.

### 3.2.4. Visual studio code

Visual studio code <sup>4</sup> es un editor de código gratis, ligero, profesional y fácil de usar disponible tanto para Linux, como para Windows, como para macOS. Probablemente representa la elección favorita de la gran mayoría de los programadores de hoy en día a la hora de elegir un editor de código. Tanto en ambientes de investigación como en entorno profesionales de producción de aplicaciones y programas Visial studio code es amnpliamente conocido y utilizado.



Figura 3.4: Visual studio code logo

<sup>4</sup><https://code.visualstudio.com/>

Visual studio code ha sido el editor elegido para la programación de todo el código de este TFG. Los algoritmos, herramientas y aplicaciones que más tarde se explicarán han sido todas gestados en este famoso editor.

### 3.2.5. Servidor landau de la URJC

Una de las principales limitaciones que los ingenieros nos encontramos a la hora de trabajar con IA, es si duda, la necesidad de un Hardware potente para el correcto funcionamiento de esta. La ejecución y entrenamiento de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático suelen ser computacionalmente muy pesado lo cuál dificulta su ejecución de manera correcta y fluida sin el Hardware adecuado. Generalmente lo más importante en este aspecto es una GPU potente. En el caso del TFG que en esta memoria se presenta, existe el problema añadido de que como anteriormente se ha mencionado se utiliza el simulador fotorealista CARLA el cuál por otra parte también requiere un gran cantidad de memoria de GPU para poder funcionar. Estos dos factores hicieron que para realizar este tfg fuera vital disponer de una GPU muy potente capaz de correr CARLA y a la vez ser capaz de ejecutar algoritmos pesados de IA.

Esta problemática hubiera sido probablemente uno de los problemas más grandes a los que este TFG se hubiera tenido que afrontar, debido a que el hardware que se necesitaba era sumamente costoso y probablemente inasumible. Afortunadamente esto no fue así ya que La Universidad Rey Juan Carlos se ofreció a proporcionar el hardware necesario ofreciendo acceso a un servidor propio y privado de la Universidad el cuál permitía ejecutar código en racks de gráficas Nvidia alojadas en la misma universidad.

De esta manera y después de que me fueran otorgados los permisos para acceder a este servidor, este se convirtió en un pilar casi imprescindible de este TFG debido a que fue en esta plataforma donde se ejecutaron CARLA y todos los algoritmo y aplicaciones de conducción autónoma de una manera lo suficientemente fluida como para permitir un comportamiento *Real time* (RT).

### 3.3. Herramientas de inteligencia artificial

Como se ha mencionado con anterioridad una de los principales objetivos del trabajo realizado para este proyecto es, crear un sistema de conducción autónoma seguro y eficaz basado en inteligencia artificial. A continuación se describen las herramientas de inteligencia artificial utilizadas en la temtativa de lograr este objetivo

#### 3.3.1. Redes neuronales

A principios del XXI hace no muchos años, más concretamente en el año 2011, los avances en el mundo del aprendizaje automático desembocaron en la creación de una nueva rama de esta disciplina, el llamado deep learning o aprendizaje profundo. El deep learning una rama hermana del machine learning, pero con tecnologías y técnicas mucho más sofisticadas. En este en vez de emplear algoritmos basados en regresión lineal o arreglos decisiones, como era típico en el machine learning, el DL se fundamentó en un nuevo concepto: Las redes neuronales profundas. Las redes neuronales, son un sistema informático que busca emular el funcionamiento de las conexiones neuronales biológicas generadas en el cerebro humano. Las redes neuronales profundas se pueden definir como un tipo de red neuronal, con un gran número de capas las cuales se transmiten y procesan la información entre sí generando un sistema complejo con mucha ‘profundidad’ de niveles lo que genera una complejidad añadida y las acerca más a imitar el comportamiento de neuronas reales.

Generalmente, una red neuronal se compone de tres partes:

1. Una capa de entrada, con nodos que simbolizan los campos de entrada. Estas son todas las variables que la red neuronal acepta y es capaz de tomar en cuenta
2. Una o varias capas ocultas, en el caso de las redes profundas suelen ser un número superior a 10 capas. Estas capas procesan la información de manera transparente para el usuario de la red
3. Una capa de salida, con un único nodo, o varios nodos, que simbolizan el campo o campos de destino. Las unidades establecen conexiones con fuerzas de conexión variables.

La primera capa recibe los datos de entrada, y los valores se transmiten de cada neurona a todas las neuronas de la siguiente capa y viceversa. Finalmente, toda la

información procesada se envía a la capa de salida y de esta se ofrece un resultado al usuario.

### 3.3.2. Aprendizaje por refuerzo

El aprendizaje por refuerzo (Reinforcement Learning, RL) es una rama del aprendizaje automático en la que un agente autónomo toma decisiones tratando de maximizar una recompensa acumulada a lo largo del tiempo. Funciona mediante la interacción del agente con un entorno. En cada paso temporal, el agente selecciona una acción basada en una política definida, por cada acción que realice el agente recibirá una recompensa. El valor de esta dependerá de como se haya definido la función recompensa previamente, una vez finalizada la acción y evaluada la recompensa de esta el agente avanzará a un nuevo estado en el que se repetirá este proceso. Esta dinámica se guía por el principio de maximizar la recompensa a largo plazo [16].

Los componentes esenciales en un sistema de RL son: el agente, que es la entidad que toma decisiones; el entorno, que representa el mundo externo con el que el agente interactúa; la política, que es la estrategia o conjunto de reglas que el agente sigue para decidir qué acción tomar en un estado dado; la recompensa, que es una señal escalar que indica qué tan bien lo está haciendo el agente después de haber tomado una acción en un estado particular; y el estado, que es una representación o descripción del escenario actual en el que se encuentra el agente

# 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] Dirección General de Tráfico. Sistemas avanzados de ayuda a la conducción (adas), 2023.
- [5] Digitalization in modern transport of passengers and freight.
- [6] Robo-taxi service fleet sizing: assessing the impact of user trust and willingness-to-use. 2019.
- [7] Pasado, presente y futuro del coche autónomo. 2021.
- [8] Road safety, health inequity and the imminence of autonomous vehicles. 2021.
- [9] Not if, but when: Autonomous driving and the future of transit. 2018.
- [10] Identificación y detección de objetos móviles mediante redes neuronales empleando el sistema nvidia jetson tx2. 2020.
- [11] Aprendizaje por refuerzo. 2023.
- [12] Tfm: Autonomous driving in traffic using end-to-end deep learning. 2023.
- [13] que es python. <https://developer.oracle.com/es/learn/technical-articles/what-is-python>.
- [14] Andrii Mazur. Python para el desarrollo de ia: ¿por qué es tan importante?, 2022.
- [15] ROS Documentation. Ros documentation.

- [16] Reforcement Learning an introduction. *Título del Libro*. 2018.
- [17] Conducción autónoma — niveles y tecnología. <https://www.km77.com/reportajes/varios/conduccion-autonoma-niveles>.
- [18] que es python. <https://developer.oracle.com/es/learn/technical-articles/what-is-python>.