



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*

# Índice general

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La robótica y la conducción autónoma . . . . .	1
1.2. Los simuladores . . . . .	5
1.3. CARLA . . . . .	6
1.4. El tfg . . . . .	8

# Índice de figuras

---

1.1. Disciplinas que componen la robótica. . . . .	2
1.2. Conducción autónoma. . . . .	4

## Listado de códigos

---



# Índice de cuadros

---

---

## Capítulo 1

# Introducción

---

### 1.1. La robótica y la conducción autónoma

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, las cuales se unen en una disciplina que pretende diseñar y construir máquinas capaces de realizar tareas de manera autónoma y autosuficiente. La historia de la robótica, aunque más reciente en términos técnicos que otras ciencias, tiene sus raíces en los autómatas y máquinas simples de la antigüedad.

Los primeros registros de autómatas datan de aproximadamente del año 1500 a.C. en la antigua Etiopía. Se habla de una estatua del rey de Etiopía que era capaz de emitir sonidos cuando al amanecer los rayos del sol la iluminaban. Aunque pueda parecer rudimentario, este mecanismo representaba un avance significativo para la época, evidenciando una temprana fascinación humana con la automatización.

Más tarde, en la antigua Grecia, surgen figuras como Arquitas de Tarento, conocido por su "Pájaro Mecánico", y Herón de Alejandría, un ingeniero que creó una variedad de dispositivos automáticos y mecanismos. En el mundo islámico medieval, innovadores como Al-Jazari diseñaron autómatas sofisticados, que reflejaban tanto el arte como la ciencia de su tiempo. (fuentes <https://www.ceac.es/blog/historia-de-los-robots-y-origen-de-los-primeros-automatas> )

Durante el Renacimiento, de la mano de una de las mentes más avanzadas de su época y uno de los más grandes ingenieros de la historia como es Leonardo da Vinci, vemos interesantes esbozos de diseños de máquinas humanoides y autómatas, que desafiaban los límites del conocimiento de la época.

La historia de los autómatas continúa hasta el siglo XX, donde, por primera vez, el término robot fue acuñado por Karel Čapek en 1920. Posteriormente, la introducción de robots industriales en la década de los 60 cambió la manufactura y producción

mundial, mejorándola, agilizándola y dejando claro el gran potencial que tenía el mundo de la robótica.

Actualmente, gracias a los avances de la mecatrónica, la informática y la inteligencia artificial, la robótica se ha integrado en diversos sectores, desde la industria y la producción con brazos robóticos en cadenas de montaje y robots de transporte de mercancías, hasta la vida más cotidiana, como las aspiradoras con algoritmos de autolocalización y navegación o los vehículos con conducción autónoma.

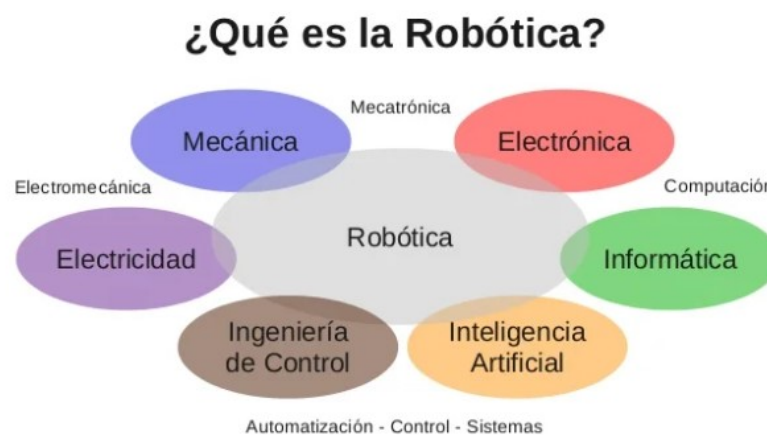


Figura 1.1: Disciplinas que componen la robótica.

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 punto A a un punto B. 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 por mucho tiempo, seguramente 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 tecnología alcanzó un nivel que permitió avances significativos en conducción autónoma. 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. Proyectos como el Grand Challenge de DARPA impulsaron la innovación en esta área, llevando a empresas y universidades de todo el mundo a desarrollar sus propios vehículos autónomos.

Hoy en día, la conducción autónoma ya no es solo una fantasía, sino una absoluta realidad. Varios fabricantes de automóviles y empresas tecnológicas han introducido prototipos y, en algunos casos, vehículos comerciales con diferentes niveles de autonomía, como los vehículos comercializados por la compañía Tesla o algunos modelos de Mercedes. Estos vehículos prometen no solo transformar la movilidad, sino también la infraestructura urbana, la economía, la forma en que vivimos y trabajamos, y en definitiva, la sociedad en su conjunto.

Como ya se ha mencionado el final del siglo XX y el siglo XXI han supuesto la época más provechosa en cuanto al desarrollo de la conducción autónoma se refiere. Inicialmente, los sistemas y algoritmos de conducción autónoma eran simples sistemas asistentes, como el control de crucero el cual mantiene constante la velocidad de un vehículo sin necesidad de apretar el acelerador o la asistencia de estacionamiento, la cual nos proporciona numerosas herramientas a la hora de realizar esta maniobra. Sin embargo, con la evolución de la inteligencia artificial, la aparición de las redes neuronales, los avances en computación y la mejora en los sensores entre otros, estos sistemas fueron mejorando rápidamente y volviéndose cada vez sistemas más completos y más grandes acercando a los vehículos a la completa autonomía. Empresas tecnológicas líderes, como Waymo, Tesla y Uber, lanzaron programas de

prueba que desplegaban vehículos sin conductor en entornos urbanos reales, recopilando así valiosos datasets y enfrentando desafíos prácticos del mundo real además de dar a conocer de familiarizar a la gente con esta nueva tecnología.

La conducción autónoma, más allá de ser una mera evolución tecnológica, promete cambiar radicalmente el paradigma de movilidad y seguridad en nuestras carreteras. Uno de los beneficios más tangibles es la drástica reducción de accidentes de tráfico. 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.



Figura 1.2: Conducción autónoma.

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. Pudiendo ocupar todo el tiempo que las personas 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.

## 1.2. Los simuladores

Dentro de todo el continuo desarrollo que ha experimentado tanto la robótica como la conducción autónoma en las últimas décadas, uno de los elementos fundamentales que ha permitido su rápido avance ha sido sin duda: los simuladores. Un simulador es un dispositivo que sirve para reproducir las condiciones propias de una actividad. En otras palabras, un simulador funciona como un sistema técnico que imita unas circunstancias reales (fuente: <https://www.definicionabc.com/tecnologia/simulador.php>). Los simuladores resultan sistemas esenciales en el mundo de la robótica y la simulación autónoma por varios motivos:

1. **“Las caídas no duelen”**: Uno de los grandes beneficios de los simuladores es que proporcionan un entorno seguro para experimentar sin consecuencias reales. En robótica, donde los prototipos y modelos reales pueden ser extremadamente caros, esto es invaluable. Un robot simulado puede “caerse”, “romperse” o ser “golpeado” repetidamente, permitiendo a los ingenieros y desarrolladores llevar sus diseños al límite sin temor a dañar equipos costosos.
2. **Flexibilidad de entornos**: Los simuladores permiten probar algoritmos, funcionalidades y sistemas en una amplia variedad de condiciones y entornos con sin tener que movilizar equipos reales a distintas localizaciones, o hacer pruebas en distintos momentos. En un simulador se puede cambiar fácilmente la iluminación, las condiciones climáticas, los escenarios y otros parámetros para ver cómo se comporta un robot o un vehículo autónomo bajo diferentes circunstancias.
3. **Entornos inaccesibles o imposibles**: Con un simulador, es posible poner robots y vehículos en situaciones o lugares a los que es imposible acceder o que son extremadamente peligrosos. Esto abre la puerta a pruebas y desarrollos que serían impensables en el mundo real. Esta característica de los simuladores destaca principalmente en robots teleoperados y robots autónomos cuya finalidad es operar fuera del planeta tierra o en entornos extremos como volcanes o desastres naturales.
4. **Exploración económica**: Antes de hacer inversiones significativas en hardware, como nuevos sensores o actuadores, los simuladores permiten a los investigadores y desarrolladores explorar y validar maneras de encajar estos aparatos en sus proyectos, comprobar su utilidad y probar maneras de integrarlos entre sí. Esto

puede ahorrar tiempo y dinero, y reduce el riesgo asociado con la adquisición de componentes que podrían no ser adecuados para una aplicación particular.

5. **Generación de bases de datos en conducción autónoma:** En el ámbito concreto de los vehículos autónomos, los simuladores son herramientas poderosas para generar de manera rauda y simple grandes bases de datos de diferentes entornos y situaciones de tráfico, las cuales resultan muy útiles para entrenar algoritmos de inteligencia artificial, aprendizaje automático y sistemas de percepción.
6. **Formación y educación:** Además de ser herramientas de desarrollo, los simuladores son recursos educativos valiosos. Pueden usarse para capacitar a los estudiantes en robótica o para formar a operadores de sistemas robóticos, familiarizándolos con los comportamientos y respuestas del sistema.

### 1.3. CARLA

Dentro del extenso panorama de simuladores dedicados a la conducción autónoma, encontramos un sinnúmero de opciones. Sin embargo, entre toda esta variedad de simuladores, CARLA destaca como una de las herramientas más interesantes. Su alto grado de realismo, 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. CARLA es un simulador de conducción autónoma realista de código abierto que ha ganado prominencia en la comunidad de investigación y desarrollo. 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 realismo. 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, derrapes, situaciones de altas y bajas velocidades, entre muchas otras características que sitúan a este simulador un paso por delante en cuanto a realismo 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, rotondas, etc., hasta 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 un control sin precedentes 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.

La diversidad de modelos probablemente sea la última de las fortalezas principales 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.

Por otro lado, una característica muy interesante de CARLA es la integración con ROS2 y ROS (Robot Operating System), el cual es probablemente el framework de robótica más prestigioso a nivel global. Esto se logra mediante `carla to ros bridge`, un puente que comunica ambos programas y nos permite crear aplicaciones verdaderamente potentes mezclando ambos mundos.

Uno de los principales motivos por los que la conducción autónoma ha avanzado tanto en los últimos años es, sin duda, el gran avance que ha experimentado la inteligencia artificial. Sobre todo, los avances en deep learning y aprendizaje por refuerzo han resultado un auténtico impulso para este ámbito. El deep learning, o aprendizaje profundo, es un subcampo de la inteligencia artificial basado en algoritmos de redes neuronales. Estas redes se inspiran en el funcionamiento biológico del cerebro humano y están diseñadas para reconocer patrones a partir de grandes cantidades de datos. Las redes neuronales profundas, con múltiples capas, permiten una representación más detallada y compleja de los datos, facilitando tareas como la detección y clasificación de objetos.

Gracias al deep learning, los vehículos autónomos han mejorado enormemente en la detección e identificación de objetos, formas y colores en su entorno. Las cámaras y sensores del vehículo capturan enormes cantidades de datos visuales que son procesados por redes neuronales para identificar y clasificar vehículos, peatones, señales de tráfico y otros elementos esenciales para una conducción segura.

El aprendizaje por refuerzo es otra rama de la inteligencia artificial que permite que un agente aprenda a tomar decisiones adecuadas basándose en su propia experiencia,



similar a cómo lo haría un ser humano. En este método, un agente toma acciones en un entorno para maximizar algún tipo de recompensa acumulativa.

En el contexto de la conducción autónoma, el aprendizaje por refuerzo ha sido esencial para enseñar a los vehículos a tomar decisiones en tiempo real. Por ejemplo, decidir cuándo adelantar, cuándo frenar ante una situación imprevista, cómo seguir los carriles correctamente o cómo navegar en condiciones de tráfico complejas. A través de la experiencia, el vehículo “aprende” las mejores acciones a tomar en función de las consecuencias de acciones anteriores y los resultados que esas acciones puedan producir, tal y como hacemos los seres humanos, optimizando constantemente su comportamiento en la carretera.

Como vemos, tanto el deep learning como el aprendizaje por refuerzo son pilares fundamentales en el funcionamiento y desarrollo de la conducción autónoma. En este TFG se han utilizado ambas tecnologías para obtener el comportamiento más eficaz posible y, además, trabajar con las tecnologías actuales que dominan este campo.

## 1.4. El tfg

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) que a continuación se presenta aborda una profunda investigación académica sobre la conducción autónoma, tomando como base el simulador CARLA, previamente detallado. Adicionalmente, se profundiza en la sinergia entre CARLA y ROS2, evaluando en particular la eficacia y viabilidad del `carla` como herramienta esencial en el diseño de soluciones integradas y robustas para la conducción autónoma. Con el objetivo de crear una investigación exhaustiva y detallada, primero se exploran 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. Se utilizará el deep learning para la detección y segmentación de nuestro agente y el aprendizaje por refuerzo, o *reinforcement learning*, para controlar las decisiones y el comportamiento que efectuará el vehículo. Finalmente, y tras exponer estos dos 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. Este análisis no solo arrojará luz sobre qué método es más efectivo en

qué circunstancias, sino que también proporcionará una visión integral de cómo pueden combinarse diferentes técnicas para lograr una solución de conducción autónoma más holística y eficiente.

Finalmente Finalizando, 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 de manera efectiva y evitar colisiones con otros vehículos, garantizando una conducción segura y eficiente en el entorno simulado de CARLA