

Trabajo de Fin de Máster

Máster en Ingeniería de Automoción

Pasado, presente y futuro del coche autónomo

MEMORIA

Autor: Francesc Xavier Claramonte Macarrón
Director: Manuel Moreno Eguílaz
Convocatoria: Enero 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

La conducción autónoma ha empezado ya un camino imparable que probablemente modificará muchos aspectos de la movilidad por carretera e, incluso, podrá tener repercusiones en las interrelaciones con otros medios de transporte. Estos efectos no solo se circunscribirán en la movilidad individual de los usuarios, sino que se extenderán a numerosos sectores empresariales que gravitan alrededor del transporte. Sin embargo, en el momento actual, todavía queda pendiente una serie de retos significativos de muy diferente índole, no solo técnica. Dentro de los aspectos tecnológicos, los más representativos recaen en los ámbitos de los vehículos, que deben integrar nuevos sensores, sistemas de comunicaciones y elementos de decisión, y la infraestructura, que debe adaptarse a las nuevas necesidades. Estos progresos irán condicionando los niveles de automatización y conectividad que se puedan proporcionar en la movilidad por carretera. Este TFM pretende mostrar el estado del arte de la tecnología dando una visión de los cambios previsibles y los retos existentes.

Además, se realiza un análisis de la situación de mercado actual, donde existen soluciones ya a la venta con niveles de conducción autónoma SAE 1, 2 y en algunos casos hasta de nivel 3, a pesar de no poder ser homologados como tal, y un sinnúmero de prototipos y pruebas piloto que han logrado alcanzar el nivel 5 en entornos controlados.

A lo largo de todo este TFM se podrá comprobar que la evolución tecnológica para poder implantar el coche autónomo con máxima autonomía es casi una realidad desde el punto de vista ingenieril, y sin embargo, queda muchísimo por hacer hasta que pueda implantarse en nuestra sociedad, ya que otros aspectos transversales como la toma de decisiones mediante inteligencia artificial, el elevado coste de los sistemas redundantes de percepción, la homologación, la propia infraestructura y los aspectos legales y éticos siguen sin estar bien definidos ni regulados.

ÍNDICE

ÍNDICE	5
1. GLOSARIO	11
2. INTRODUCCIÓN	13
2.1. Objetivos del proyecto	13
2.2. Motivación del proyecto	14
2.3. Alcance	14
3. ESTADO DEL ARTE	15
3.1. Orígenes	15
3.2. ¿Qué es la conducción autónoma?	17
3.3. Niveles de conducción autónoma	18
3.4. Tecnología necesaria para la conducción autónoma	22
4. ESTUDIO DE MERCADO ACTUAL	27
4.1. Prototipos de vehículos de nivel 4 y 5	29
4.2. Accidentes	37
5. ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS	41
6. FUTURO DE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA	45
6.1. Impacto sobre el transporte	46
6.2. Cambios tecnológicos necesarios	49
6.3. Necesidades en la infraestructura	51
7. PRESUPUESTO	55
CONCLUSIONES	57
AGRADECIMIENTOS	59
BIBLIOGRAFÍA	61
Referencias bibliográficas	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coche nº9 diseñado por Norman Bel Geddes en 1933. Fuente [5].....	15
Figura 2. Demostración Prometheus en Paris en 1994. Fuente [6].	16
Figura 3. Niveles de conducción autónoma. Fuente: [1].....	18
Figura 4. Tesla Model S. Fuente: [1].	20
Figura 5. Hardware de los vehículos autónomos. Fuente [10].....	22
Figura 6. Vehículo equipado con sensores LiDAR en el techo. Fuente [13].....	24
Figura 7: Tres modelos de LIDAR de la marca Velodyne. Fuente [9].....	25
Figura 8. Previsión de ventas en 2035 según PwC. Fuente [12].	27
Figura 9. Audi AI Traffic Jam Pilot. Fuente: Audi.	28
Figura 10. Autopilot de Tesla. Fuente [19].....	29
Figura 11. Prototipo Firefly de Waymo. Fuente: Waymo.	30
Figura 12. Taxis autónomos de Waymo. Fuente [20].	31
Figura 13. Zoox, el coche autónomo de Amazon. Fuente [21].	32
Figura 14. XC90 de Uber y Volvo. Fuente [23].	33
Figura 15. Prototipo Cruise AV de General Motors. Fuente [24].	34
Figura 16. Cruise Origin de General Motors. Fuente [25].	35
Figura 17. Tesla Model S involucrado en accidente mortal. Fuente [27].	38
Figura 18. Accidente mortal de un Tesla Model X en 2018. Fuente [28].	39
Figura 19. Dilema moral. Fuente [16].	41
Figura 20. Taxi autónomo de Waymo funcionando en Arizona. Fuente: Waymo.	44
Figura 21. Conducción autónoma y conectada. Fuente [29].	45

Figura 22. Problemas de señalización vertical. Fuente [29]. 53

Figura 23. Problemas de señalización variable. Fuente [29]. 53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Presupuesto. Fuente propia.	55
---	----

1. Glosario

Se exponen en la siguiente lista los acrónimos utilizados en el presente documento en su idioma original y una traducción al castellano cuando se considera necesaria:

- ABS: “*Antiblock Brake System*” – Sistema antibloqueo de ruedas.
- ACC: “*Adaptative Cruise Control*” – Control de crucero adaptativo.
- ADAS: “*Advanced Driver Assistance Systems*” – Sistemas avanzados de asistencia a la conducción.
- ADS: “*Automated Driving Systems*” – Sistemas de conducción autónomos.
- AEB: “*Autonomous Emergency Braking*” – Frenado de emergencia autónomo.
- ECU: “*Electronic Control Unit*” – Unidad de control electrónico.
- ESP: “*Elektronisches Stabilitätsprogramm*” – Programa Electrónico de Estabilidad.
- LIDAR: “*Laser Imaging Detection and Ranging*” – Sistema de medición y detección de objetos mediante láser.
- LKA: “*Lane Keeping Assist*” – Asistente de mantenimiento de carril.
- MIT: “*Massachusetts Institute of technology*” – Instituto tecnológico de Massachusetts.
- ONU: “*Organización de Naciones Unidas*”.
- SAE: “*Society of Automotive Engineers*” - Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices.

2. Introducción

En lo que llevamos de siglo XXI, debido al aumento de las tecnologías y de las nuevas necesidades de la sociedad, hemos empezado a ver circular por nuestras carreteras vehículos que, en mayor o menor medida, empiezan a ser autónomos: se aparkan solos, circulan en autopista conservando la distancia de seguridad o, incluso, frenan para evitar un atropello. No obstante, todavía falta tiempo para que se comercialice un vehículo totalmente autónomo, que pueda circular sin conductor en cualquier carretera y en cualquier condición meteorológica.

Actualmente se están desarrollando multitud de proyectos de investigación no sólo por parte de los principales fabricantes de vehículos sino también compañías como Apple, Google e incluso empresas dedicadas al “*Car-Sharing*” como Uber, dedicados ya no solo a la constitución de sistemas de ayuda a la conducción si no a la obtención de sistemas autónomos de transporte. El trabajo desarrollado tanto por parte de los fabricantes como de empresas privadas o instituciones públicas está dando como resultado sistemas cada vez más complejos, útiles y fiables. Parece claro que el sector de la automoción tiene como objetivo principal reducir o eliminar 3 aspectos clave; las emisiones, las víctimas y/o accidentes y reducir lo máximo posible el número de propietarios, para hacer un uso más eficiente de los vehículos.

A medida que el coche autónomo se va convirtiendo en una realidad, se plantean diferentes problemas y/o retos que deben resolverse para que éstos estén preparados para circular por cualquier carretera del mundo, ya que, de entrada, deberían convivir con los vehículos tradicionales con conductor y en una infraestructura que todavía está muy lejos de estar 100% preparada.

2.1. Objetivos del proyecto

El presente documento tiene como meta dar a conocer el estado del arte del coche autónomo, analizando tanto las diferentes tecnologías disponibles, como los aspectos legales y éticos relacionados con la sociedad y la infraestructura.

Además, se realizará un estudio de mercado para comprobar la implicación de los principales fabricantes de automóviles, y los resultados obtenidos en las pruebas piloto en cuanto autonomía y accidentes.

2.2. Motivación del proyecto

Este proyecto de carácter bibliográfico se ha realizado debido a la situación excepcional de la pandemia mundial COVID 19. El director y tutor de este TFM, Manuel Moreno Eguílaz, me dio la oportunidad de realizarlo sobre algún tema que fuera de mi interés.

Elegí realizar el presente proyecto sobre la conducción autónoma debido a mi escaso conocimiento inicial sobre el tema, con la motivación de ampliar mis conocimientos sobre un aspecto que sin duda es, y será de gran importancia en el sector de la automoción y que me será de utilidad en mi futuro profesional ya que trabajo en el desarrollo de mazos de cableado para vehículos.

Otro de los motivos a la hora de seleccionar la temática fue la de investigar más acerca del futuro más inmediato del mundo de la automoción, para saber donde estaban los impedimentos para que el coche autónomo no sea ya una realidad en nuestra sociedad.

2.3. Alcance

En lo referente al alcance del proyecto, éste analizará la evolución de la conducción autónoma a lo largo de los años en el sector de la automoción, y se analizarán los impedimentos, tanto ingenieriles como legales, que no están permitiendo alcanzar el nivel máximo de conducción autónoma.

Además, se realizarán comparativas entre los diferentes modelos y propuestas que los diferentes fabricantes han realizado, en cuanto a nivel de automatización y número de accidentes.

Por último, se realizará un análisis de las diferentes propuestas de futuro y los retos a corto plazo que debe abordar el sector, para tratar de dar pasos importantes a la hora de lograr el objetivo de la conducción autónoma.

3. Estado del arte

3.1. Orígenes

En 1925, Francis Houdina, ingeniero eléctrico de la ciudad de Nueva York, fue el primero en poner en práctica el concepto de vehículo autónomo [4]. Para ello, utilizó una tecnología a través de ondas de radio para conducir un vehículo sin conductor a distancia. El control remoto por radiofrecuencia podía encender el motor del vehículo, hacerlo circular esquivando a otros vehículos y hacer sonar el claxon, pero el vehículo debía ir acompañado de un coche escolta desde el cual se dirigía. Para tal fin creó su propia empresa, Houdina Radio Control y su primer prototipo fue enseñado al público en Manhattan, recorriendo aproximadamente 19 kilómetros, hasta que chocó con otro automóvil. A pesar de esto, el Chandler, se construyó entre 1926 y 1930 y fue comercializado bajo el nombre Phantom Auto.

Todo cambió en 1939 cuando con motivo de la Exposición Universal, Norman Bel Geddes, un diseñador industrial estadounidense, presentó en la feria de Futurama la idea de coches eléctricos conducidos de forma autónoma por radiocontrol a través de carreteras automáticas, con un circuito eléctrico integrado en el pavimento.



Figura 1. Coche nº9 diseñado por Norman Bel Geddes en 1933. Fuente [5].

A pesar de no ser exactamente la idea de coche autónomo que tenemos hoy en día, esta exposición marcó un antes y un después, y consiguió que muchas empresas tecnológicas

aumentaran su interés por esta forma tan peculiar de transporte. Esta misma idea, que utilizaba carriles fijados a cada vehículo, fue explorada ya en los años 60 por General Motors y la Radio Corporation of America.

La mayoría de los avances en el coche autónomo se deben a un único nombre, Ernst Dickmanns, un alemán que profesor de la Bundeswehr University de Múnich y experto en inteligencia artificial que lideró la construcción del primer coche autónomo moderno [3]. Para ello utilizó una tecnología avanzada que combinaba la visión sacádica (un movimiento rápido del ojo, cabeza u otras partes del cuerpo de animales o dispositivos) con cálculos probabilísticos y computación paralela.

En 1987 Dickmanns diseñó una furgoneta Mercedes-Benz con esta tecnología y consiguió con éxito conducir por una autopista sin conductor alcanzando velocidades de 100 km/h sin tráfico.

Más adelante, en 1994 un Mercedes 500 SEL rebautizado como 'VaMP' recorrió más de 1.000 kilómetros en la carretera de circunvalación que rodea la ciudad de París, incluso era capaz de adelantar a otros coches y alcanzar velocidades de hasta 130 km/h.



Figura 2. Demostración Prometheus en Paris en 1994. Fuente [6].

Tras esta serie de experimentos la Comisión Europea mostró su interés en la idea y realizó una generosa inversión de 800 millones de euros en el bautizado como proyecto EUREKA Prometheus para el desarrollo del coche autónomo. De nuevo, en 1995 Dickmans modificó

un Mercedes-Benz Clase S para que realizara un viaje entre Munich y Copenhague. Este robot alcanzó velocidades de hasta 175 km/h en las Autobahn y el 95 % del trayecto se llevó a cabo de forma totalmente autónoma.

A raíz del concurso DARPA Grand Challenge de 2005, donde el equipo de Sebastian Thrun (director del Stanford Artificial Intelligence Laboratory y coinventor de Google Street View) resultó ganador con un vehículo autónomo llamado Stanley, Google empieza a desarrollar vehículos autónomos bajo el nombre de Waymo. Sin embargo, debido a la legislación de Estados Unidos, no pueden realizar pruebas en entornos reales hasta que en 2012 el estado de Nevada modifica la regulación de tráfico, permitiendo a Google obtener licencias para probar sus vehículos, siendo el primer vehículo en conseguir la licencia un Toyota Prius con el sistema Driverless de Google instalado.

3.2. ¿Qué es la conducción autónoma?

La conducción autónoma es una modalidad de conducción que consiste en el manejo del vehículo sin el control activo de un conductor cuando su tecnología esté activa. Un vehículo autónomo está considerado como tal cuando está equipado con la suficiente tecnología que permita su manejo sin precisar de forma activa el control o supervisión de un conductor, tanto si dicha tecnología autónoma estuviera activa o desactivada, de forma permanente o temporal. Por tanto, cuando nos referimos a conducción autónoma, nos referimos a un vehículo capaz de realizar las siguientes tareas:

- Control de movimiento lateral del vehículo a través de la dirección.
- Control del movimiento longitudinal del vehículo mediante aceleración y desaceleración.
- Monitorización del entorno a través de la detección de objetos y eventos, incluye reconocimiento, clasificación y preparación de respuestas.
- Ejecución de la respuesta ante objetos y eventos.
- Planificación de maniobras.
- Aumento de la visibilidad a través de iluminación, señalización, etc.

3.3. Niveles de conducción autónoma

Las empresas automovilísticas ya incorporan automatismos en algunos de sus vehículos, que descargan al conductor de realizar ciertas tareas. Para poder comparar entre las distintas prestaciones de diferentes vehículos, la Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices (SAE) estableció en 2014 el estándar J3016, un código de actuación o buena conducta a seguir por todos los fabricantes, con una clasificación para determinar cuál es el nivel de autonomía de los vehículos. Este baremo cuenta con 6 niveles [1]:

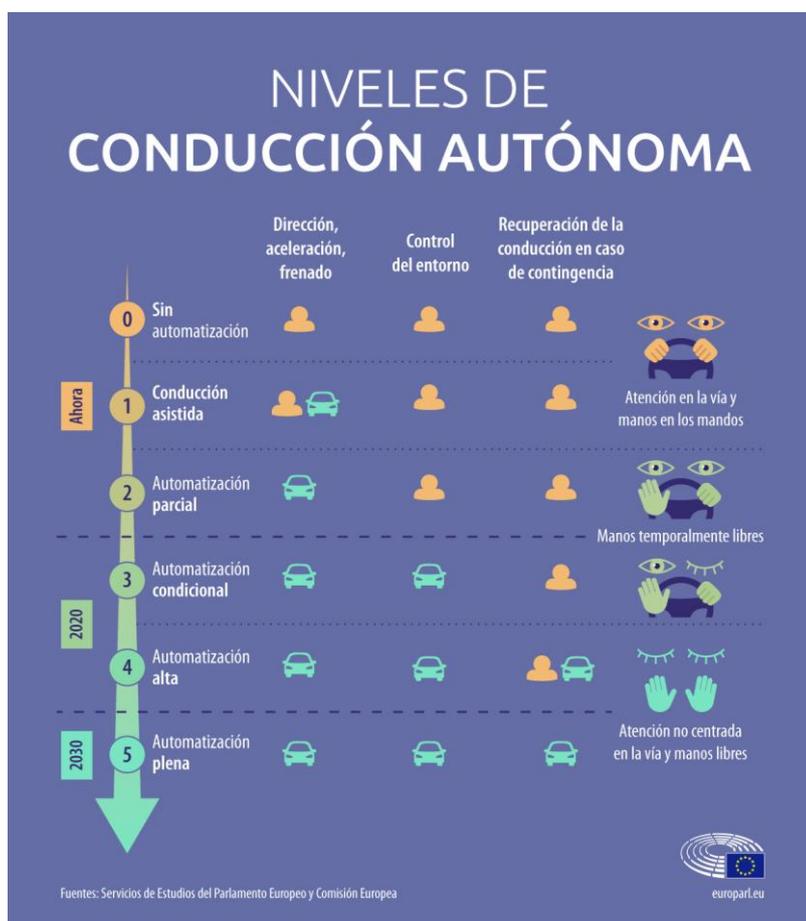


Figura 3. Niveles de conducción autónoma. Fuente: [1].

Nivel 0: Sin automatización

Es el nivel inicial. El conductor está al mando y se hace cargo de todas las acciones necesarias para conducir el vehículo. Los sistemas de seguridad activa como el ESP o el ABS, aunque suponen una ayuda a la conducción, no se consideran automatización.

Nivel 1: Autonomía básica

Los vehículos de nivel 1 son aquellos que pueden controlar el movimiento lateral o longitudinal, pero no los dos a la vez, por ejemplo, por medio de un sistema de frenada de emergencia (AEB), un control de velocidad de cruce adaptativo (ACC), o un sistema de aviso de cambio involuntario de carril. Gran cantidad de los coches a la venta actualmente están en este nivel. En 1999, el Mercedes-Benz Clase S se convirtió en el primero, al contar con un control de velocidad adaptativo asistido por radar (Distronic), que le permitía mantener la distancia en autopista incluso en condiciones de niebla o lluvia intensa.

Nivel 2: Automatización parcial

En este nivel, los vehículos tienen asistentes a la conducción que permiten controlar el movimiento lateral y también el longitudinal. Aquí empezamos a tener cierta autonomía, que permitiría al conductor separar las manos del volante y la vista de la carretera, aunque solo durante breves periodos de tiempo. Por ejemplo, si se combina un control de cruce adaptativo con un asistente de mantenimiento de carril (LKA), un vehículo podrá circular por una autopista de forma autónoma. Los sistemas de aparcamiento automático, en los que el vehículo toma el control del volante y los pedales, también permiten que un vehículo sea considerado como perteneciente al nivel 2 de autonomía. El primer coche en alcanzar el nivel 2 fue el Mercedes-Benz Clase S en 2013.

Nivel 3: Automatización condicional

En los coches de este nivel, el conductor puede decidir que el sistema de conducción automatizada tome el control del vehículo y realice todas las funciones de la conducción, aunque con unas ciertas limitaciones.

Para ello, los vehículos deben ser capaces de analizar el entorno y tomar decisiones. Esta tecnología utiliza sensores y cámaras para registrar todo lo que sucede alrededor del vehículo para que, en el momento en que el conductor cede voluntariamente el control, el coche pueda tomar las decisiones oportunas. De este modo, pueden circular por una autopista e, incluso, tomar una salida y continuar circulando por carretera, o detenerse y avanzar en medio de un atasco sin que el conductor realice maniobra alguna. Eso sí, el

conductor debe estar siempre pendiente de lo que sucede en la carretera para volver a tomar el control en caso necesario, bien porque el sistema no sepa cómo actuar ante una situación imprevista de peligro, por ejemplo, ante unas obras en la carretera, o bien porque se sobrepasen sus límites geográficos de actuación. En esos casos, el sistema da un margen de tiempo, de varios segundos, para el que conductor vuelva a retomar el control del vehículo. Actualmente, los máximos representantes del nivel 3 de autonomía son el Autopilot del Tesla Model S y el nuevo Audi A8.



Figura 4. Tesla Model S. Fuente: [1].

Nivel 4: Automatización alta

En este nivel, el sistema de conducción automatizada puede conducir el vehículo de forma sostenida en el tiempo sin la expectativa de que el conductor responda ante una demanda de intervención, salvo cuando se encuentre fuera de su ámbito de actuación. El sistema está preparado para actuar ante una situación imprevista de peligro y para realizar sin ayuda el conjunto de acciones que desenlacen en la situación más segura posible (se le denomina situación de mínimo riesgo). Aunque el sistema de conducción automatizada de los vehículos de nivel 4 también tiene un ámbito de actuación, y puede avisar al conductor para que retome la conducción, en el caso de que el conductor no responda, el vehículo será capaz de detenerse en una zona segura (no se espera que el conductor retome el control). Es decir, el conductor tan solo tendría que indicar el lugar al que quiere desplazarse y dejarse llevar, aunque tendría la posibilidad de tomar el control del coche porque éste seguiría

teniendo los mandos (volante, pedales) para poder ser conducido por un conductor humano. Un ejemplo de vehículos de este nivel serían los coches autónomos de Google, que ya circulan en pruebas en entornos controlados.

Nivel 5: Automatización plena

En el nivel 5, el sistema de conducción automatizada (ADS, automated driving system) tiene un ámbito de funcionamiento que comprende todas las condiciones y lugares por los que podría circular un conductor humano. Esto quiere decir que para el ADS no se diseñan limitaciones geográficas o climatológicas y, por tanto, que el vehículo puede prescindir de un conductor... y de elementos como el volante o los pedales.

Aunque puede parecer un pequeño paso con respecto al nivel anterior, la autonomía total es un desafío para la tecnología actual, porque implica sustituir al conductor en cualquier situación o condición, lo que incluiría conducir sobre caminos no asfaltados, en situaciones meteorológicas adversas... o incluso aparcar entre columnas en un oscuro aparcamiento subterráneo. Además, hay que tener en cuenta que no todo dependerá del vehículo en sí, sino también de la posibilidad de comunicación con otros vehículos, con las infraestructuras o con los centros de control de tráfico. Este nivel de automatización requiere de cambios legislativos, además de una serie de intervenciones en infraestructuras.

Algunas empresas están trabajando actualmente en prototipos de vehículos autónomos de nivel 5, con el objetivo de poder operar taxis o camiones autónomos. También se está trabajando en avances tales como autopistas en las que los vehículos autónomos eléctricos se recargarían por inducción mientras circularan por ellas.

3.4. Tecnología necesaria para la conducción autónoma

Los sistemas de conducción autónoma necesitan de varios sistemas de sensores, para captar información y convertirlo en información electrónica que se gestionará mediante las centralitas (ECUs). Hoy en día, éstos son los más habituales en los vehículos [8]:

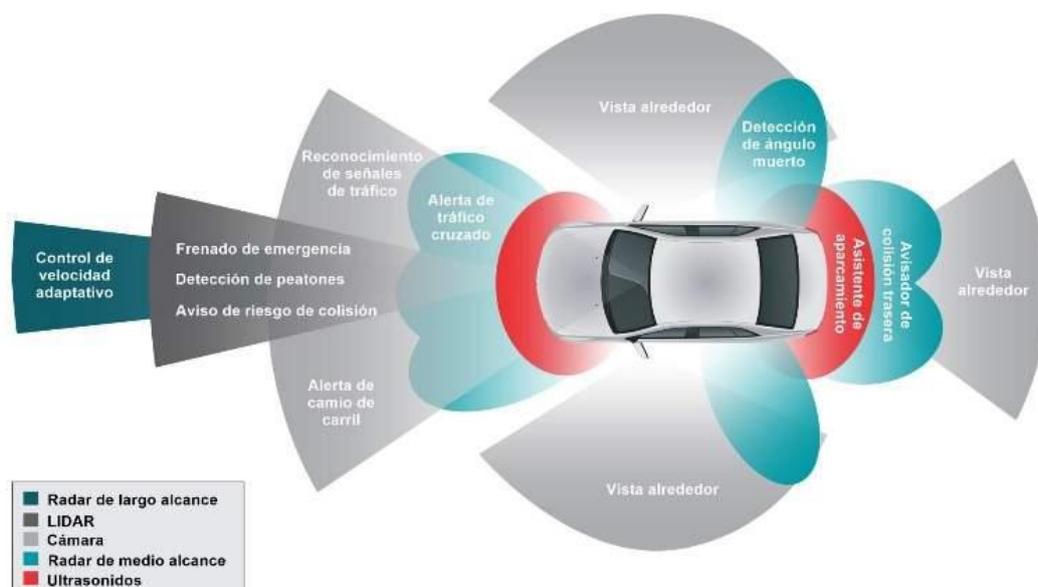


Figura 5. Hardware de los vehículos autónomos. Fuente [10].

- **Sensores ultrasónicos.** Son efectivos para detectar elementos que se encuentran a poca distancia del vehículo. Funcionan emitiendo ondas sonoras no audibles y calculando el tiempo que tardan en regresar al punto de emisión. Son frecuentes desde hace varios años en los automóviles, por su bajo coste, y suelen emplearse en los sistemas de ayuda al aparcamiento y en las alarmas.
- **Posicionamiento y navegación por satélite.** Su uso también está extendido desde hace varios años. Estos sistemas pueden localizar un vehículo en cualquier punto del planeta mediante la técnica de triangulación, utilizando una red de satélites. Su principal inconveniente es que tiene un margen de error de unos (pocos) metros, por lo que requiere de otras técnicas para conseguir una localización más precisa, necesaria para los niveles altos de autonomía. Existen varios sistemas de

posicionamiento y navegación por satélite en funcionamiento, todos ya compatibles entre ellos: GPS, GLONASS y Galileo.

- **Sistemas de navegación inercial.** Intervienen sensores de movimiento y sensores giroscópicos que calculan en todo momento, mediante estima y sin referencias externas, la posición de un vehículo, su dirección y su velocidad. Suelen utilizarse en conjunto con los sistemas de posicionamiento para aumentar su precisión, aunque todavía no garantizan una precisión suficiente para una conducción autónoma plena.
- **Sistema de cámaras.** Están generalizados en automoción. La tecnología está muy desarrollada desde el punto de vista de la calidad y el bajo precio de las cámaras. No obstante, su efectividad se reduce en condiciones de poca luz o de climatología adversa.
- **Sensores infrarrojos.** La luz infrarroja del espectro es invisible al ojo humano y se emplea para detectar y realizar un seguimiento de objetos en condiciones de poca luz. Desde principios de la década de 2010 comienzan a ser relativamente frecuentes como elementos de equipamiento opcional en vehículos de gama alta. El primer vehículo que se ofreció con un sistema de visión nocturna fue el Cadillac DeVille del año 2000.
- **Radar.** Utiliza ondas electromagnéticas para detectar y realizar un seguimiento de objetos. Puede funcionar con mucha precisión en distancias de hasta unos 300 metros y es muy efectivo principalmente para determinar la presencia de otros vehículos, y también para determinar la dirección en la que viaja y a qué velocidad lo hace. Su efectividad apenas decrece en condiciones de baja visibilidad o climatología adversa y, además, su coste es relativamente bajo. Su uso ya está generalizado en la industria del automóvil en asistentes a la conducción como el control de crucero adaptativo, la detección de vehículos en el ángulo muerto, el frenado automático de emergencia o los sistemas de protección previa a la colisión.
- **Lídar.** Es un acrónimo del inglés LIDAR (Laser imaging detection and ranging). Este sistema permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto utilizando haces láser pulsados. Los sistemas lídar modernos permiten recoger información complementaria al radar ya que la distancia de alcance de los haces láser es mucho mayor que la de los ultrasonidos y el grado de definición que se consigue sobre la información del entorno es mucho más alto. La información recogida mediante este

complejo sistema de láseres y espejos permite generar mapas tridimensionales en tiempo real, formados por nubes de puntos que se actualizan permanentemente. Este tipo de mapas son de vital importancia para lograr producir vehículos con niveles 4 y 5 de autonomía.

Existen varios tipos de LiDAR, por un lado, los fijos colocados en la zona alta del parabrisas, por delante del espejo retrovisor, consisten en una unidad con lentes para la emisión de los haces láser y una lente para la captación de los haces reflejados. Es común combinarlos con cámaras de vídeos, para detectar peatones o señales de tráfico. Su principal uso es para aplicaciones cuando el vehículo circula a baja velocidad, como sistemas de frenado de emergencia y sistemas para proteger al peatón. Por otro lado, el más habitual es un dispositivo colocado en el techo del coche que gira 360 grados sobre sí mismo para cubrir todo el entorno. La lente emite 64 rayos láser y gira sobre sí mismo 360 grados de manera permanente, a 900 vueltas por minuto, para monitorizar todo el entorno del coche, con hasta 2,2 millones de puntos por segundo. Tiene un alcance de 50 metros para el pavimento y de 120 metros para vehículos, peatones y árboles.



Figura 6. Vehículo equipado con sensores LiDAR en el techo. Fuente [13].

El principal fabricante de estos dispositivos es Velodyne que ha desarrollado otros modelos de menor tamaño y precio, por ejemplo, el modelo HDL-32E usado en el Ford Mondeo autónomo, en el que se disponen de cuatro unidades, cada uno emite 32 rayos láser, giran

también sobre sí mismos 360 grados a 600 vueltas por minuto, con hasta 0,7 millones de puntos por segundo. El alcance es de 80 a 100 metros para vehículos, peatones y árboles. Con los cuatro se procesan en total más de 2,5 millones de puntos.

El modelo más económico y compacto es el VLP-16, con 3 variantes, Puck, Puck Lite, y Puck Hi-Res. Emite 16 rayos láser, gira 360 grados, cubre hasta 0,3 millones de puntos por segundo y llega hasta 100 metros de alcance.



Figura 7: Tres modelos de LIDAR de la marca Velodyne. Fuente [9].

Los vehículos autónomos necesitan recopilar la información de todos estos sistemas de sensores y combinarla para poder tener un conocimiento completo del entorno. Lógicamente, esta recogida de datos tiene que estar en constante actualización, adaptándose a los movimientos del propio vehículo. Es habitual que se elabore un mapa tridimensional que permita localizar la posición del vehículo respecto al entorno. Por otro lado, esta información se compara con mapas recopilados previamente, lo que permite ubicar un vehículo con una precisión casi absoluta, aunque solamente en aquellas zonas previamente cartografiadas.

Pero el mayor desafío de los sistemas de conducción autónoma radica en el desarrollo del software que realice una interpretación correcta de las imágenes y una posterior elaboración de las decisiones correctas. Para ello, se suele utilizar un algoritmo de *machine learning*, al que se entrena con distintas imágenes que muestren todas las situaciones de tráfico posibles. Cada una de las imágenes se asocia con el tipo de vehículo que contiene.

El algoritmo empieza a procesar las imágenes. Inicialmente, intenta adivinar qué vehículo hay en cada imagen y al principio se equivocará muy a menudo. Como conoce que vehículo hay en realidad en cada imagen, modificará y adaptará parámetros internos y lo volverá a intentar. El proceso continuará, reduciendo sucesivamente la tasa de fallos. Más adelante, cuando se le presenten nuevas imágenes podrá clasificarlas correctamente. Ese mismo enfoque se puede utilizar para la toma de decisiones. En vez de proporcionar una lista de normas con las que evaluar la acción a tomar para cada situación, se entrena un algoritmo con situaciones de tráfico en las que se especifica la acción correcta a tomar. Igual que antes, el algoritmo intentará adivinar la acción correcta y modificará parámetros internos en función de si se equivoca o acierta.

En resumen, las limitaciones tecnológicas de los vehículos autónomos actuales no residen en el hardware, sino en el software, como veremos más adelante.

4. Estudio de mercado actual

Se especula mucho sobre la conducción autónoma y la realidad es que este tipo de tecnología está mucho más cerca de lo que se piensa. Sin embargo, el estudio de la consultora PwC, 'Digital Auto Report 2020' demuestra que, dentro de 15 años, en 2035, sólo el 1% de los coches serán de conducción 100% autónoma e inteligente en zonas como Europa, Estados Unidos y China [11], ya que la caída de las ventas de vehículos y la crisis del COVID19 ha provocado una ralentización de las inversiones.

El impacto de la pandemia no sólo está afectando a las ventas, que han cerrado el año 2020 con una caída global de alrededor del 14%, sino que también está ralentizando las inversiones tanto de desarrollo de vehículos autónomos como de nuevas tecnologías en las que el sector lleva muchos años trabajando.

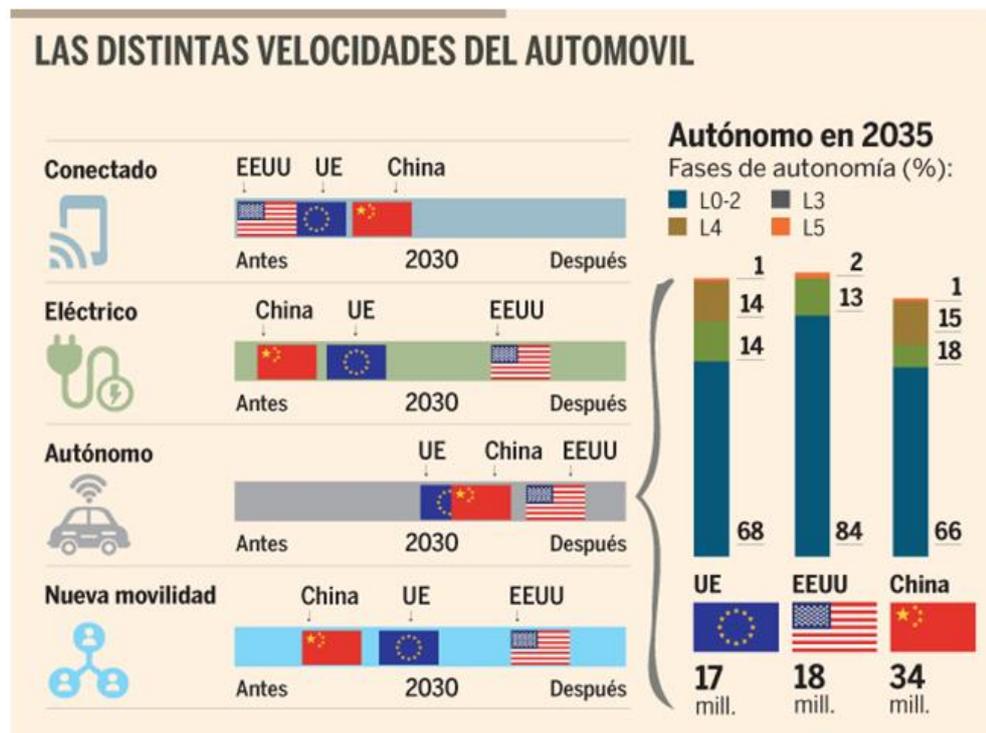


Figura 8. Previsión de ventas en 2035 según PwC. Fuente [12].

China quiere que el 50% de sus coches sean de nivel 2 y 3 en 2025, ya que gobierno y fabricantes han elaborado un plan de actuación en el que los vehículos de nivel de conducción autónoma mencionados anteriormente deben suponer el 70% de las ventas en 2030. En el mismo plan, prevén que los coches de nivel 4 de autonomía representen el 20% de las ventas en el mismo año.

Por otro lado, la mayoría de los coches nuevos que se venden hoy en día en Europa ya dispone de uno o varios sistemas de conducción autónoma (ADAS), como por ejemplo, el control de crucero adaptativo, la frenada de emergencia o el asistente de cambio de carril, pudiéndolos considerar de nivel 1 ó de nivel 2 cuando son capaces de actuar de forma independiente en determinadas ocasiones, como por ejemplo los últimos modelos de SEAT que ya controlan movimientos laterales y longitudinales bajo la supervisión del conductor.

En cuanto al nivel 3 de autonomía podríamos considerar el sistema Autopilot 3.0 de Tesla (si bien es cierto que con la legislación actual debe considerarse de nivel 2, ya que el conductor debe permanecer atento y asumir el control en cualquier momento) de los modelos Tesla Model S, Tesla Model X y Tesla Model 3 y al nuevo Audi A8, que cuenta con un sistema llamado "Traffic Jam Pilot", un sistema que puede ser activado por el conductor en circunstancias inferiores a 60km/h, tráfico denso, con ausencia de semáforos y peatones y en autopistas o carreteras de varios carriles con una barrera física de separación entre calzadas. Está ideado para lidiar con todas las funciones relativas a un atasco. Este vehículo está equipado con 12 sensores, 4 cámaras de 360 grados, una cámara frontal en el parabrisas, 5 radares, un escáner láser y una cámara de observación sobre el cuadro de mandos. Toda la información es enviada a un procesador que genera una imagen virtual de todo lo que sucede a su alrededor.



Figura 9. Audi AI Traffic Jam Pilot. Fuente: Audi.

Otro aspecto que debemos tener en cuenta es que la combinación de vehículos cada vez más autónomos con el auge de los servicios de *car-sharing*, puede provocar que tienda a desaparecer el uso del coche privado. Esto provocaría una caída en picado de las ventas de coches nuevos ya que, al reducirse los costes de los servicios de coche compartido respecto a la de vehículos privados, daría como resultado que las flotas de compañías como Uber fueran las que conformaran la circulación en los países desarrollados.

4.1. Prototipos de vehículos de nivel 4 y 5

En este apartado se analizarán los prototipos más destacables que se están desarrollando con los niveles más altos según la escala de conducción autónoma de la SAE.

Autopilot 4.0 de Tesla

La compañía tiene previsto la producción en masa del chip HW4.0 en el cuarto trimestre de 2021, el cual será 3 veces mejor que el actual 3.0 [18]. Según Tesla, el actual hardware será más que suficiente para alcanzar la capacidad de conducción autónoma total. Actualmente, ya está disponible la beta para un grupo reducido de usuarios seleccionados del “Full Self-Driving”, el modo de conducción autónomo más avanzado de la compañía estadounidense. Los vehículos equipados con el chip HW3.0 en los modelos S, X y 3, podrán desbloquear el modo de conducción anteriormente mencionado. Sin embargo, la beta de este modo de conducción debe ser utilizada con precaución y en todo momento se deben mantener tanto las manos en el volante como la atención en la carretera. Según datos técnicos el sistema procesa hasta 2.300 fotogramas por segundo, operando en 4D utilizando 8 cámaras de visión, 12 sensores ultrasónicos, radar y un nuevo chip.



Figura 10. Autopilot de Tesla. Fuente [19].

A pesar de todo, Tesla sigue teniendo certificación SAE 2 en sus vehículos, y se espera que con estas mejoras tecnológicas sean capaces de alcanzar el nivel 4.

Waymo Firefly de Alphabet Inc (matriz de Google)

El Waymo Firefly fue uno de los primeros prototipos en realizar pruebas en entorno real y alcanzar el nivel 5, aunque siempre en entornos de pruebas controlados. Waymo, antes conocida como Google Self-Driving Car Project, es una empresa desarrolladora de vehículos autónomos perteneciente al grupo Alphabet, pero es globalmente conocida como el coche de Google. Se trata de la empresa más experimentada en el desarrollo de este tipo de vehículos, acumulando más de 15 millones de kilómetros en vías públicas.



Figura 11. Prototipo Firefly de Waymo. Fuente: Waymo.

En el año 2014 la empresa creó su propio coche, el icónico Firefly, un pequeño automóvil de dos plazas que carecía de volante y pedales, con un botón de encendido y una pantalla que mostraba la ruta y una velocidad máxima de 40 km/h. La finalidad era puramente educativa, para identificar la mejor situación de sensores y las necesidades de los pasajeros entre otros. El vehículo contaba con los siguientes señores:

- LiDAR de 360 grados, con capacidad para generar 2,2 millones de puntos por segundo, situado encima del coche.
- 4 radares situados en diferentes puntos del parachoques.
- Una cámara situada delante del espejo retrovisor para detectar las luces de los semáforos.

Para el análisis de los datos contaba con una plataforma de Intel, y una base de datos con mapas 3D almacenados. Para circular, el vehículo comparaba los datos obtenidos en vivo con los mapas internos, pudiendo definir qué elementos eran estacionarios y cuales no. A la vez, era capaz de calcular la velocidad a la que se movían todos los elementos no

estacionarios y sus posibles trayectorias para adaptar en base a estos la ruta a seguir.

En 2017 se descartó la producción de estos vehículos y la empresa decidió seguir desarrollando tecnología autónoma, pero utilizándola sobre vehículos de otras compañías.

Prueba de ello es que, desde el pasado 8 de octubre de 2020, Waymo utiliza su tecnología en 600 monovolúmenes Chrysler Pacifica en la ciudad de Phoenix, en Arizona, para realizar un servicio de taxi autónomo. Estos coches están catalogados como nivel 4, por lo que pueden circular de forma autónoma en zonas delimitadas, hasta ahora es el nivel más alto conseguido y disponen de conductor de seguridad, aunque los quieren retirar en breve, si la legislación de los diferentes territorios se lo permite. El vehículo es capaz de completar trayectos en un área que abarca un radio de unos 80 km, ya que tiene la zona perfectamente mapeada y trazada para facilitar la labor del hardware que equipa. La empresa dispone de un equipo de empleados remotos que observan las transmisiones en tiempo real de las cámaras del vehículo y pueden ayudar con sólo presionar un botón, si el software se encuentra en un lugar difícil y necesita la ayuda humana para descubrir que está sucediendo.



Figura 12. Taxis autónomos de Waymo. Fuente [20].

Zoox de Amazon.com Inc.

El gigante de compras online, Amazon, decidió comprar la empresa californiana de vehículos eléctricos autónomos Zoox en junio de 2020 para, según indican, “ayudar a llevar a la realidad su visión de la conducción autónoma”.

A finales de 2020, tan sólo 6 meses después, han presentado su primer vehículo, un

habitáculo rectangular con cuadro ruedas con un tamaño contenido de 3,63 m de largo y con capacidad para 4 pasajeros gracias a sus asientos simétricos [21].

El vehículo tiene la capacidad de desplazarse de forma bidireccional, es decir, su diseño simétrico hace que sea igual la parte delantera y trasera, pudiendo desplazarse de forma normal sin tener que hacer un giro de 180 grados, siendo capaz de realizar maniobras precisas como esquivar furgonetas aparcadas en doble fila o realizar giros complicados en U.

Otra de las cualidades de Zoox es la enorme batería que monta, de 133 kWh de capacidad (los Model S de Tesla la llevan de 85 kWh), algo que le permitirá operar 16 horas de forma continua y la compañía asegura que podrá viajar a una velocidad de hasta unos 120 km/h, pudiendo así circular también por autopistas.

El robotaxi de Zoox [22] está equipado con tecnología de seguridad como una corona con seis discos LIDAR en la parte superior, así como múltiples sensores de radar y cámaras. La compañía asegura que esto proporciona un campo de visión de 270 grados en cada esquina, eliminando virtualmente los puntos ciegos. El conjunto de sensores permite que el vehículo vea objetos a una distancia de hasta 150 metros, y cuenta con redundancia en caso de que falle un sensor.

Actualmente, Zoox no ha puesto una fecha de puesta en real de su vehículo autónomo, pero sí que están realizando pruebas en diferentes ciudades de Estados Unidos como Las Vegas, San Francisco y Foster City y la compañía planea el lanzamiento de un servicio de transporte privado basado en aplicaciones.



Figura 13. Zoox, el coche autónomo de Amazon. Fuente [21].

Además de unir sus fuerzas con Zoox, Amazon trabaja con otras empresas del sector del transporte. La compañía de Jeff Bezos colabora con Rivian en la creación de una flota de furgonetas de reparto eléctricas y con Aurora, una start-up que se ha hecho con la división de conducción autónoma de Uber.

XC90 de Uber Advanced Technologies Group (ATG) y Volvo

Uber y Volvo presentaron su coche con capacidad de conducción autónoma total, poco más de un año después del primer atropello mortal de uno de sus prototipos en pruebas. Se trata de una XC90 modificada que integra los sensores necesarios para conducirse sin la intervención humana [23]. En los últimos años estuvieron probando algunos prototipos. Sin embargo, ninguno de ellos era totalmente autónomo, pues una persona debía mantenerse en el asiento de conductor para reaccionar en caso de emergencia. Ambas compañías se encontraban trabajando desde septiembre de 2016 en la investigación de la conducción autónoma, pero el nuevo software fue diseñado para que una computadora sea la única responsable del trayecto.



Figura 14. XC90 de Uber y Volvo. Fuente [23].

El vehículo incorpora un sistema de respaldo de frenado, dirección y potencia que se activará si el sistema autónomo principal presenta algún problema. Incluso es posible detener el vehículo por completo. Para ello, disponen de un módulo sobre el techo en el que se integran radares LiDAR de alta precisión, así como sensores de ultrasonidos y cámaras. Estos sistemas cuentan con sistemas de alimentación redundantes, y conservan tanto unos

pedales como un volante, que permiten tomar el control a un conductor humano si algo fuera mal.

Al mismo tiempo, el coche, en su propio funcionamiento autónomo, cuenta con una programación diseñada para detener el coche en caso de algún fallo en sus sistemas de control o navegación. Por el momento, estas tecnologías, pese a haber sido testadas durante millones de kilómetros en condiciones reales de circulación, no serán implantadas en su variante 100% autónoma. Los primeros Volvo XC90 autónomos de Uber tendrán a bordo un "Mission Specialist", una forma de decir que en ellos irá conductor especialmente formado para supervisar el funcionamiento del coche y tomar el control si algo fuera mal.

Su plan consistía en iniciar un servicio de robotaxis que harían uso del nuevo vehículo en áreas autorizadas por las autoridades, principalmente carreteras, aunque dejaron claro que los sensores de la parte superior están listos para funcionar en entornos urbanos.

Sin embargo, debido a la pandemia COVID19, Uber finalmente ha decidido vender su división de coches autónomos a la start-up estadounidense Aurora Innovation (participada por Amazon), quedándose con una participación del 26% en Aurora.

Cruise AV y Cruise Origin de General Motors

En 2018, General Motors anunció, adelantándose a todo fabricante, la creación de su primer vehículo cien por cien autónomo, nivel SAE 5, el Cruise AV, un coche sin pedales, sin volante y sin ningún requerimiento de acción manual. Este modelo cuenta con tecnología nombrada anteriormente, lo que le permite ver en 360°. Equipado con cinco LiDAR, 16 cámaras y 21 radares, es un coche inspirado en el Chevrolet Bolt EV de nivel 4.



Figura 15. Prototipo Cruise AV de General Motors. Fuente [24].

Aunque el prototipo ya ha sido probado, las leyes de ningún país permiten que este tipo de vehículo circule. Por este motivo, General Motors presentó una petición de seguridad al departamento de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico de Estados Unidos, petición que en junio de 2019 fue rechazada.

Tas la negativa, General Motors insistió en el desarrollo de un vehículo específicamente autónomo totalmente eléctrico y junto con Honda, han obtenido su fruto.

El Cruise Origin es un vehículo con aspecto más de transbordador que de coche y con capacidad para seis personas en su interior y tamaño similar a un SUV.



Figura 16. Cruise Origin de General Motors. Fuente [25].

Cruise Origin no dispone ni de capó delantero ni de maletero, a fin de cuentas, no los necesita. En su lugar aprovecha el espacio para colocar seis asientos espaciosos que se parecen más a los de un vagón que a los de un coche, ya que se miran los unos a los otros y no están dispuestos hacia delante como en los coches tradicionales. Ninguno de estos asientos es para el conductor, porque una vez dentro no hay nada que te indique que puedas tomar el control del Cruise Origin. Según indican, el coche podrá operar tanto de día como de noche sin descanso porque no hay conductor que tenga que descansar (se entiende que habrá que recargarlo), con una vida útil para el vehículo de un millón de millas (algo más de un millón y medio de kilómetros).

El nivel de conducción autónoma para este vehículo todavía no está del todo claro.

Proyecto Titán de Apple

Apple sigue avanzando en su tecnología de coches autónomos y apunta a 2024 para producir un vehículo de pasajeros con un nuevo diseño de batería que podría reducir radicalmente el coste de estas y aumentar la autonomía de los vehículos. Su principal objetivo es competir con Tesla y Waymo.

Para lograr el objetivo, la compañía lleva trabajando desde 2014 en el denominado “Proyecto Titán”, en el que se están centrando expresamente en el desarrollo de un software de conducción autónoma para poder venderlo a otras marcas de vehículos de importancia en el mercado.

Grupo Volkswagen y Ford

Ambas compañías, han unido sus esfuerzos en el desarrollo de coches autónomos a través de la empresa Argo AI, en la cual han invertido 7.000 millones de dólares, para obtener una arquitectura de conducción autónoma de nivel 4.

4.2. Accidentes

Todas las partes interesadas quieren demostrar que la introducción de vehículos autónomos supondrá una mejora, no sólo por las oportunidades económicas sino también por el aumento de la seguridad del transporte por carretera.

Una de las ventajas de los vehículos autónomos es la reducción teórica de accidentes (aproximadamente un 25%) que hace que estos coches sean más seguros. Según el informe "Automated Vehicle Crash Rate Comparison Using Naturalistic Data" realizado por el Virginia Tech Transportation Institute y encargado por Google, las estimaciones de la tasa de accidentes nacionales en Estados Unidos con vehículos convencionales serán de 4,2 accidentes por millón de millas, mientras que la tasa de accidentes con coches autónomos podría ser de 3,2 por millón de millas.

A pesar de que el 94% de los accidentes de tráfico se producen debido a errores humanos, varios estudios aseguran que los coches autónomos sólo serán capaces de evitar aproximadamente un tercio de ellos, los que corresponden a los accidentes causados por errores de percepción, como distracción del conductor o escasa visibilidad y los accidentes causados por errores de incapacitación, como el consumo de alcohol o drogas o por quedarse dormido al volante.

Las compañías de vehículos autónomos rechazan un porcentaje tan bajo de éxito de este desarrollo técnico (el mencionado 34%). Por su parte, los socios de Automated Vehicle Education, un grupo que tiene entre sus miembros a muchas compañías que desarrollan coches de este tipo, alegan que el estudio "asume incorrectamente" que la percepción superior y la falta de distracción son "las únicas formas" en que estos coches pueden conducir "mejor que los humanos".

Los vehículos autónomos, por ejemplo, se pueden programar para que nunca infrinjan las normas de tráfico, lo que el estudio atribuye al 38% de los accidentes. De esta manera, la cifra de sucesos que se evitaría escalaría hasta el 72%.

No cabe duda de que la tecnología está muy avanzada, pero no exenta de errores, tal como sucede en el sector de la aviación. Es difícil recopilar todos los accidentes generados hasta ahora, pero a continuación se expondrán los más relevantes:

- **El 7 de mayo de 2016**, ocurrió el primer accidente con víctima mortal. Un Tesla Model S con Autopilot conectado, se estrelló de modo perpendicular contra un camión. El accidente tuvo lugar en una carretera dividida cuando un camión con remolque atravesaba una carretera perpendicular, donde ni el conductor ni los sistemas del vehículo detectaron el cruce del vehículo. Debido a que el cielo estaba muy iluminado, los sensores del vehículo no

detectaron el obstáculo y por ende no se aplicaron los frenos ni las estrategias de evasión.



Figura 17. Tesla Model S involucrado en accidente mortal. Fuente [27].

La carretera era una autovía de cuatro carriles, con una intersección, y el accidente tuvo lugar en un día claro y sin lluvias. A la distracción del conductor y a su excesiva confianza en el Autopilot se unió la incapacidad del sistema para anticipar y reaccionar ante el giro del camión y al hecho de que el hardware debería haber impedido al vehículo circular por ciertas vías, para las que no estaba preparado.

Tras el accidente, Tesla redujo el tiempo de aviso para emitir una alarma cuando se quitan las manos del volante.

- **El 18 de marzo de 2018**, un Volvo XC90 con el sistema autónomo de Uber, atropelló mortalmente a una mujer que cruzaba de noche, andando con su bicicleta, la carretera fuera de un paso de peatones. Según el informe el sistema clasificó al peatón en un primer momento como objeto desconocido, luego como vehículo y finalmente como bicicleta. 1,2 segundos antes del accidente el sistema concluyó que era necesario frenar, pero ya era tarde. En el interior del vehículo siniestrado estaba un operario de Uber, que debía supervisar el trayecto, como en todas las pruebas que se iniciaron en 2016, pero éste se encontraba utilizando su smartphone sin prestar atención a la carretera.

Meses después, un informe de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte de Estados Unidos (NTSB), aseguró que no se trató de un fallo en los sistemas sino de un error en la programación del software, ya que el vehículo no estaba programado para identificar y actuar ante peatones imprudentes, porque había sido configurado con un retraso de un segundo para iniciar el frenado después de detectar un objeto en la carretera, con el objetivo de descargar posibles falsos negativos. Uber también desactivó los sistemas de seguridad que la propia Volvo había instalado en su XC90, para evitar que interfirieran con sus

sistemas. Simulaciones posteriores con el software corregido, demostraron que el sistema hubiera sido capaz de detectar al peatón 88 metros o 4,5 segundos antes del impacto a una velocidad de 69,5 km/h, lo que le hubiera permitido frenar a tiempo y evitar el accidente.

Tras este accidente, Uber suspendió todas las pruebas y no las reanudó hasta 2 años después, cuando el departamento de vehículos de California otorgó un permiso a la empresa ATG para poder circular en las vías públicas de San Francisco. Desde entonces, Uber realiza las pruebas de día, con clima despejado y con la presencia de dos operadores en cada vehículo autónomo.

- **El 23 de marzo de 2018**, un Tesla Model X, chocó a 113 km/h con una barrera, colisionó con otros dos vehículos, y acabó incendiándose. El vehículo circulaba con el Autopilot encendido y, durante los 18 minutos previos al accidente, el conductor apenas mantuvo las manos en el volante a pesar de que el sistema le emitió dos advertencias visuales y una acústica para que así lo hiciera. Los últimos 6 segundos antes de colisionar el conductor no actuó ni sobre el volante ni sobre los frenos, ya que, según la reconstrucción de los hechos posterior, se encontraba jugando a un juego con el móvil.



Figura 18. Accidente mortal de un Tesla Model X en 2018. Fuente [28].

- **El 1 de marzo de 2019**, se produjo el tercer accidente fatal de Tesla. Un Tesla Model 3 utilizando el piloto automático chocó con un camión en Florida, lo que provocó la muerte del conductor de 50 años. El análisis del NTSB (National Transportation Safety Board) en Estados Unidos reveló que el conductor no tenía las manos en el volante en el momento del accidente, y de hecho conectó el piloto automático 10 segundos antes del choque. El Model 3 viajaba a 109 km/h en una autopista con un límite de 89 km/h, y ni el sistema ni el conductor maniobraron ante una situación que provocó que el coche de Tesla acabara con el techo destrozado al pasar por debajo del semitrailer del camión.

- **En junio de 2020**, de nuevo un Tesla Model 3 utilizando el sistema Autopilot se estrelló contra un camión que había volcado sobre dos de los carriles de una autopista de Taiwan. En las imágenes se puede ver cómo todos los coches que circulaban por la carretera se apartan para esquivar al camión. Sin embargo, un Tesla de color blanco va directo hacia el camión. Solo en el último momento el conductor parece percatarse de la presencia del camión y logra frenar, aunque termina chocando. Por fortuna, los ocupantes del vehículo salieron ilesos del accidente.

En todos los casos anteriormente comentados, había conductor en el interior de los vehículos, pero en ninguno de los casos fue capaz de evitar el accidente, debido a la relajación y excesiva confianza en un sistema que todavía no está preparado para una conducción autónoma total.

La tecnología es más fiable en condiciones ideales de visibilidad, por lo que es fundamental seguir investigando en el punto de débil, de condiciones climáticas adversas como poca visibilidad, lluvia, terrenos mal asfaltados o condiciones de demasiada luminosidad.

En Estados Unidos los fabricantes están obligados a reportar la cantidad de veces que sus vehículos autónomos han necesitado de la intervención humana para corregir errores. Este informe lo realiza el departamento de vehículos a motor de California.

5. Aspectos legales y éticos

A lo largo de este documento se ha podido comprobar que ya está disponible la tecnología necesaria para hacer posible la conducción autónoma, y, sin embargo, estamos muy lejos de poder alcanzarla debido al marco legislativo. Este es diferente según el país y queda mucho por hacer para regular este tipo nuevo de conducción.

En el futuro, con la infraestructura conectada, los vehículos, las carreteras, etc., todos los posibles escenarios e inputs que pueda recibir un vehículo serán calculados y este sabrá como reaccionar en un amplio rango de escenarios antes de que estos sucedan. Hoy en día, los coches autónomos disponibles, deben lidiar con riesgos desconocidos. Estos pueden predecir muchos escenarios, pero debido a la aleatoriedad y a los imprevistos, la ética es todavía algo que resolver para que el vehículo pueda tomar la decisión en estos casos.

En 2016, un grupo de investigadores del MIT Media Lab crearon 'Moral Machine', un juego de ética que planteaba a los participantes el tipo de cuestiones éticas que, tarde o temprano tendrán que resolver los coches autónomos [14]. De este se esperaba encontrar el consenso moral para resolver preguntas cruciales, que, en los próximos años, decidirán la vida y la muerte de muchas personas en las carreteras de todo el mundo. El estudio reveló que la tendencia era siempre a salvar a las personas de menor edad, y hasta el 40% de los participantes declararon que lo principal era salvar su vida, sin importar a quién hubiera que matar para lograrlo. Es un tema muy difícil de resolver y que siempre ha generado controversia a lo largo de la historia. ¿Qué es el bien y el mal?



Figura 19. Dilema moral. Fuente [16].

En términos de ética, hay dos puntos de vista fundamentales. Por un lado, el postulado de Derek Parfit, dice que, aunque todas las tradiciones morales parezcan diferentes, en

realidad éstas son como escaladores subiendo la misma montaña por caminos diferentes. Es decir, existe diversidad de valores y normas morales, pero todas acaban convergiendo al final. Por otro lado, Alasdair MacIntyre defiende que el ser humano aún no ha llegado a un consenso moral sobre lo que está bien o mal porque nuestros valores son incompatibles entre sí y que no seremos capaces de encontrar un consenso general frente a problemas éticos. ¿Cómo vamos a programar un automóvil para que actúe correctamente si no existe una concepción del bien en la que estemos todos de acuerdo?

Probablemente en el futuro, en un mundo completamente conectado, será posible que los vehículos tomen mejores decisiones que los humanos, basándose en enormes análisis de datos, estadísticas y decisiones deterministas instantáneas basadas en la minimización de los daños sin discriminar edad, género, raza de cualquier persona. Pero de la misma manera, si finalmente el coche elige matar a alguien, porque esta ha sido la mejor elección o la moralmente “correcta”, ¿quién será el responsable? ¿El propietario, el fabricante, el vehículo? ¿Cómo se homologarán este tipo de vehículos? ¿Cómo funcionarán las compañías de seguros?

Otro punto importante será la seguridad de la que dispondrán estos vehículos, ya que todos podemos imaginar la amenaza que supondría que estos fueran susceptibles de ser hackeados.

A pesar de todo esto, el principal problema seguirá siendo que no exista un consenso global en cuanto, a los temas éticos, ya que estos dependerán de la clase social, la religión o las tradiciones y/o convicciones de cada persona. Muchos países están desarrollando leyes para regular estos consensos éticos y algoritmos para poder establecer las bases de los coches del futuro.

En España la DGT emitió en 2015 un documento con el que autorizaba a los fabricantes a realizar pruebas y ensayos de investigación con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico general. En esta regulación se definió el vehículo autónomo como “todo vehículo con capacidad motriz equipado con tecnología que permita su manejo o conducción sin precisar la forma activa de control o supervisión de un conductor, tanto si dicha tecnología autónoma estuviera activada o desactivada, de forma permanente o temporal” [17]. Con esta definición se excluyen los vehículos de hasta nivel 2 incluidos, y obliga a los vehículos de mayor nivel a solicitar una autorización para la realización de pruebas. El primer vehículo en solicitar dicha autorización fue un Citroën C4 Picasso, para realizar la ruta Vigo-Madrid, siendo el vehículo el responsable de controlar tanto la aceleración y desaceleración, como giros y adelantamientos. En marzo de 2016, entró en vigor la norma que autorizaba a los vehículos a realizar la maniobra de aparcamiento de manera autónoma, sin necesidad de tener al conductor en el interior del vehículo, siempre y cuando la distancia no superara los 15 metros entre el inicio y el fin de la maniobra.

En mayo de 2018 la Comisión Europea publicó un escrito sobre la estrategia de la Unión Europea para la movilidad automatizada mostrándose a favor y argumentando la necesidad de una regulación.

En muchos países, ya es posible circular con vehículos catalogados hasta nivel SAE 3, ya que requiere siempre el respaldo de un conductor, sin embargo, la normativa no es clara en caso de que falle algo justo cuando se realice una acción automatizada. Por este motivo, la ONU acaba de elaborar una nueva normativa que entrará en vigor en enero de 2021, la cual ya han firmado más de 50 países entre los que se encuentran Japón, Corea del Sur y todos los miembros de la Unión Europea (no así Estados Unidos) [15].

Entre las medidas destacan principalmente la obligatoriedad de que:

- Todos los sistemas automatizados de mantenimiento de trayectoria limiten su velocidad operativa en conducción autónoma a un máximo de 60 km/h.
- Sólo podrán activarse en carreteras donde los peatones y ciclistas no puedan circular ni estar cerca, ni en aquellas donde no haya separación física entre carriles de distintos sentidos.
- Equipar cajas negras en los vehículos, para ser analizadas en caso de accidente.
- Las pantallas y sistemas de entretenimiento a bordo que puedan ser empleados por el conductor para actividades distintas a la conducción deberán suspenderse de forma automática cuando el sistema solicite al conductor que retome el control del coche.
- Introducción de sistemas que detecten cada 30 segundos la presencia y atención del conductor.
- Los fabricantes deben demostrar antes de la comercialización de estos vehículos que estos cumplen con los requisitos de seguridad y de protección de datos para evitar el hackeo y deben gestionar la actualización periódica del software.

Por su parte, Estados Unidos a través de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras (NHTSA en sus siglas en inglés) ha realizado una propuesta en la que moderniza las normas permitiendo los vehículos sin volante para el transporte de personas, en los que no serían gestionados por un ser humano ni en caso de emergencia. Tras más de una década de trabajo, la compañía Waymo, comenzó a ofrecer al público en la ciudad de Phoenix (Arizona) su servicio de taxis que se conducen 100% solos. Es cierto que son uno de los países más avanzados en pruebas automáticas de vehículos en entornos controlados, pero aún no disponen de un marco regulatorio federal.



Figura 20. Taxi autónomo de Waymo funcionando en Arizona. Fuente: Waymo.

Podemos concluir que, de momento, existen muchos vacíos legales en cuanto a responsabilidad y que, conseguir un estándar compatible para todo el mundo, va a resultar una tarea compleja de resolver, donde gobiernos, fabricantes e instituciones deben cooperar para la implementación de medidas que intenten reducir el porcentaje de escenarios donde el vehículo, siguiendo decisiones deterministas, pueda tomar la mejor decisión sin estar sujetas a cuestiones éticas.

6. Futuro de la conducción autónoma

Lukas Neckermann defiende en su libro “The Mobility Revolution” [30] que el futuro de la automoción de la mano de la conducción autónoma y conectada tendrá como objetivo reducir o eliminar tres aspectos clave: las emisiones, los accidentes y/o víctimas y los propietarios. Todo hace indicar que van a tener que pasar muchos años hasta que se pueda alcanzar dicho objetivo, pero es incuestionable que esa es y debe ser la tendencia.

En cuanto a las emisiones, de sobra son conocidos los esfuerzos del sector para tratar de reducirlas y el desarrollo de nuevos combustibles o electrificación de los vehículos. En cuanto a los accidentes, la mayoría de ellos se producen por fallos humanos o como mínimo con el factor humano implicado. Tiene sentido pensar, que, si quitamos esta variable, evitaremos muchísimos accidentes. Finalmente, en cuanto al objetivo de cero propietarios, señala que ya hay demasiados coches en la sociedad y que, con las previsiones existentes de aumentar cada vez más el parque automovilístico mundial, no tiene mucho sentido que se avance en esa dirección, ya que las horas reales de utilización de los vehículos son muy escasas y con pocos pasajeros dentro. Por esta razón, está creciendo la cultura del *car-sharing* o el *car-pooling*.

No cabe duda de que la llegada de la conducción autónoma será crucial para mejorar los aspectos comentados anteriormente. Sin embargo, en el momento actual, todavía queda pendiente una serie de retos significativos de muy diferente índole, no solo técnica. Dentro de los aspectos tecnológicos, los más representativos recaen en los ámbitos de los vehículos, que deben integrar nuevos sensores, sistemas de comunicaciones y elementos de decisión, y la infraestructura, que debe adaptarse a las nuevas necesidades. Estos progresos irán condicionando los niveles de automatización y conectividad que se puedan proporcionar en la movilidad por carretera. En este capítulo se mostrará una visión de los cambios previsibles y los retos existentes.



Figura 21. Conducción autónoma y conectada. Fuente [29].

6.1. Impacto sobre el transporte

En esta sección se analizarán los impactos sociales, económicos y ambientales esperables con la movilidad autónoma.

El vehículo autónomo no puede entenderse en el ámbito de la movilidad como una pieza aislada, ya que nos encontramos actualmente ante una revolución total, donde aspectos como la *Mobility as a service*, el Blockchain, la inteligencia artificial, el Big Data, la posibilidad de utilizar otros medios de transporte (como drones, patinetes eléctricos, etc.), la aparición de energías limpias como los vehículos eléctricos o mediante pila de combustible, la economía colaborativa o la impresión 3D, van a cambiar totalmente la movilidad.

También están teniendo lugar cambios sociales debido a la pandemia global COVID19, como son el auge del teletrabajo, la racionalización de los viajes de trabajo y reuniones, la mayor demanda de entregas a domicilio, un mayor distanciamiento social y la preferencia de la gente a vivir en lugares más espaciosos, generando así un modelo urbano más disperso. Todo esto hace que se reduzca la movilidad, a la vez que crezcan los medios de transporte individuales para evitar los colectivos, el comercio electrónico cobre mayor importancia, y que la ocupación del transporte público sea menor.

De cara a lograr el vehículo autónomo, existen dos vertientes: la liberal y la centralizada. La primera de ellas consiste en dotar a los vehículos del hardware suficiente para ser autónomos, como por ejemplo los prototipos descritos en los capítulos previos, mientras que la centralizada apuesta por la conectividad del coche con la infraestructura (V2i). Es probable que al final el objetivo acabe lográndose, mezclando las dos vertientes.

A continuación, se analizarán los diferentes impactos con altos niveles de penetración que provocará la llegada del vehículo autónomo.

- **Movilidad:**

En primer lugar, en el ámbito de la movilidad, surgirá un nuevo modelo que no existe en la actualidad, complementario al transporte público y privado. La combinación de la automatización y del *Mobility as a service*, va a dar lugar a una nueva figura que será el vehículo de alquiler sin conductor, que va a tener dos ventajas muy importantes respecto al transporte público y al taxi, como son la reducción del coste para el usuario y la gran accesibilidad que tendrá. Previsiblemente esto dará lugar a que haya una reducción muy importante de los vehículos en propiedad y a que el transporte público se utilice mucho menos.

- **Coste de los vehículos**

La aparición de los vehículos de alquiler sin conductor provocará que el coste de usarlos sea mucho más competitivo ya que, el vehículo se depreciará menos por kilómetro porque se utilizarán más y estarán menos tiempo parados, se evitarán los costes del conductor, los servicios podrán ser compartidos gracias a la conectividad y la automatización reducirá el consumo de energía.

- **Forma de transporte de las personas:**

Dará lugar a un amplio rango de posibilidades de movilidad, desde la persona con mucho poder adquisitivo, que podrá disponer de su propio vehículo con todo lujo de detalles hasta las personas más humildes, que podrán compartir furgonetas autónomas a un precio muy barato. Los vehículos serán más accesibles tanto para niños, personas mayores o personas discapacitadas. Todo esto provocará que los viajes dejen de ser una pérdida de tiempo, ya que podrá aprovecharse para hacer otras actividades como trabajar, ver la televisión, etc.

- **Congestión de las carreteras:**

En este aspecto existen de nuevo dos tendencias. Por un lado, en favor de reducir la congestión, la mayor capacidad de coordinar los vehículos a través del *platooning* dará lugar a un incremento de capacidad de las carreteras, y combinándolo con la *Mobility as a service*, se podrá aumentar la ocupación por vehículo. Sin embargo, como argumentos en contra podemos asumir que, al tener la movilidad un precio más asequible, crezca mucho la demanda y la captación del transporte público, congestionando así las carreteras. En cualquier caso, este aspecto genera mucha incertidumbre y más aún en la fase transitoria y en la que convivirán vehículos autónomos con los convencionales, pudiéndose generar conflictos importantes.

- **Competencia con el transporte público:**

En el ámbito de la competencia con el transporte público, el vehículo autónomo cambiará la concepción actual y ya no tendrán sentido determinadas rutas con poca demanda o poca frecuencia, y pasarán a ser realizadas por vehículos autónomos tanto públicos como privados. Esto permitirá reducir las subvenciones en líneas con tráfico débil y puede generar un modelo urbano más disperso, ya que actualmente las viviendas se concentran próximas a los sitios donde hay acceso al transporte público.

- **Uso del suelo y medioambiente**

La reducción de los costes del transporte y el posible aprovechamiento del tiempo durante los mismos dará lugar a que crezca la movilidad y los vehículos hagan más kilómetros. Esto unido a ciudades más extensas, causadas también por el impacto de la pandemia, pueden generar mayores impactos ambientales y por lo tanto, la necesidad de crear una regulación, como por ejemplo establecer un pago por uso de infraestructuras de acceso a las ciudades.

- **Parking y entorno urbano**

El vehículo autónomo aparcará mucho menos y lo hará por sí sólo, lo que hará que el parking en superficie no sea tan necesario. En su lugar se podrá mejorar la calidad de vida de las personas ofreciendo más espacios urbanos como aceras de mayor amplitud para pasear o para los comercios.

- **Seguridad**

Con el tiempo se espera que la seguridad mejore, ya que el factor humano dejará de ser un problema, pero surge la duda de si los accidentes, aunque sean menor en número pudiesen tener un impacto mayor. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la ciberseguridad, ya que podría convertirse en un serio problema en cuanto a privacidad y ataques masivos si no se protege correctamente.

- **Consumo de energía**

Este es otro de los temas que más incertidumbre genera, ya que, por un lado, la mayor demanda por el bajo coste, la mayor extensión de las ciudades y un transporte público menos competitivo provocarán que aumente el consumo de energía. Sin embargo, la posibilidad de realizar *platooning*, una conducción más eficiente y un mayor uso del vehículo compartido, podría provocar que se equilibrara la balanza. El balance final dependerá del equilibrio de ambas partes y de la posible regulación de éstas.

- **Competitividad y empleo**

La reducción del coste del transporte de mercancías implicará una mayor competitividad y proporcionará ventaja a zonas o regiones periféricas, como por ejemplo España dentro de la Unión Europea, que en la actualidad se ve muy penalizada por los altos costes de transporte para situar sus productos en el centro de Europa. Por otro lado, existirá un impacto importante en el empleo, ya que los conductores convencionales dejarán de tener sentido y deberán adoptar otro papel. Mientras que no esté instaurada la conducción autónoma al 100%, los conductores deberán seguir estando presentes, pero cada vez con más liberación y disponibilidad para poder realizar otras tareas. También crecerá el empleo en investigación

e innovación, generando así un trabajo de mayor calidad que en el pasado.

- **Mercado de seguros y responsabilidad negligente**

El mercado de los seguros deberá cambiar radicalmente, ya que, si los accidentes disminuyen, las pólizas también deberán hacerlo y, las compañías de seguros ofrecerán mejores precios a los vehículos que dispongan de sistemas de seguridad más sofisticados. También deberá modificarse las responsabilidades por negligencia, y los conductores dejarán de ser los responsables de los accidentes, pasando a ser mayoritariamente de los fabricantes o proveedores de componentes. Todo esto obligará a una reestructuración en el mercado de seguros, que se está viendo como uno de los principales problemas para acelerar la implantación del vehículo autónomo.

Como se ha podido observar, el vehículo autónomo supondrá una revolución social y económica que llegará poco a poco. Aunque todavía existen muchas incertidumbres por despejar en aspectos clave como la congestión y el consumo de energía, parece que sí que tendrá un fuerte impacto en los usos del suelo y la concepción del territorio y que son los aspectos legales y no los tecnológicos lo que está provocando que se retrase su puesta en marcha.

6.2. Cambios tecnológicos necesarios

Como se ha explicado a lo largo del documento, hoy en día ya disponemos en las carreteras de vehículos autónomos con diferentes niveles de autonomía capaces de realizar tareas que no sean las que le pida explícitamente el conductor. Existen coches hiper sensorizados capaces de reconstruir el entorno de una manera muy fiable y robusta, vehículos que pueden comunicarse de forma inalámbrica con el exterior, tanto con la infraestructura como con otros vehículos, etc.

La conducción autónoma ha dejado de ser la utopía que era hace 40 años. A continuación, se analizarán los cambios tecnológicos o retos necesarios sobre el vehículo para conseguir alcanzar la conducción autónoma de nivel 5 en cualquier entorno, ya que los prototipos que lo han alcanzado lo han conseguido en escenarios controlados y muy preparados para lograr el objetivo.

- **Sistemas de percepción**

Los sistemas de percepción son uno de los puntos más importantes de la arquitectura de un vehículo autónomo que debemos fortalecer para ser capaces de lograr el objetivo. Se debe

trabajar para establecer qué tecnologías podrán utilizarse, cómo se podrán fusionar los diferentes sensores y cómo conseguir robustez en la identificación de obstáculos o elementos viarios.

- **Conducción conectada**

Se deberá aclarar qué tipo de tecnología es la que se quedará. Actualmente existe una discusión sobre si debemos usar tecnologías de largo o de corto alcance y qué tecnología utilizar para cada una de las aplicaciones. También hay que aclarar cómo gestionar la privacidad, los volúmenes de datos y la calidad de éstos, para decidir si son buenos o fiables.

- **Posicionamiento**

No es suficiente con el posicionamiento que existe para las aplicaciones de navegación, sino que se requerirá más precisión y detalle y una constante actualización de toda la información de mapas electrónicos.

- **Toma de decisiones**

Es sin duda el otro aspecto fundamental dentro de la arquitectura de la conducción autónoma. Es el cerebro del vehículo y debe garantizar una conducción segura, pero también flexible, es decir, deberá saber abordar situaciones complejas, como por ejemplo una rotonda con tráfico denso, y no sólo supeditarse únicamente a normas estrictas de circulación que posiblemente le ahoguen y no puedan tomar una decisión clara como tomaría un humano aun siendo seguro.

- **Conductor**

Pasa a tener otro papel completamente diferente, muy importante en las transiciones entre automático y manual y en las iteraciones con el vehículo.

- **Aspectos transversales**

Aspectos transversales como la fiabilidad, la ciberseguridad y la validación. A una máquina, a diferencia de los humanos, se le exige que no cometa errores y por lo tanto un nivel máximo de fiabilidad. En línea con la alta fiabilidad tenemos todas las herramientas de validación, que serían necesarios muchísimos kilómetros para conseguir validar y testear todas las aplicaciones, algo que no es viable y que debe resolverse mediante la validación mediante simulaciones fiables

- **Aspectos legales, éticos, etc.**

Como se ha comentado a lo largo de todo el documento, existen otros aspectos transversales de aspecto no tecnológico a tener muy en cuenta, como la responsabilidad en caso de que algo falle, todos los temas legislativos que rompen con el esquema actual de los códigos de circulación, la aceptación de los usuarios o aspectos éticos, como el clásico dilema de la toma de decisiones de un vehículo autónomo ante una situación de peligro.

6.3. Necesidades en la infraestructura

Hasta ahora contamos con una infraestructura física de carreteras muy valiosa para la conducción humana, complementada con una limitada infraestructura digital. Los nuevos vehículos de automatización de bajo nivel que disponemos hoy en día en el mercado se apoyan en esa infraestructura física y un poco en la digital. En este capítulo se analizarán cuales son las necesidades en la infraestructura para poder utilizar coches de mayor nivel de automatización en nuestras carreteras.

En primer lugar, se analizarán las limitaciones que presenta la infraestructura actual. En ese sentido, se dividirán las limitaciones en tres bloques: las de diseño geométrico, las de señalización y las de pavimento.

Diseño geométrico:

- **Curvas horizontales:**

Se están realizando estudios sobre la interacción de los vehículos autónomos con la infraestructura y, en cuanto a las curvas en planta, existe una relación entre el radio de la curva y las velocidades que pueden desarrollar los vehículos automatizados para mantener el control del vehículo, trazando la curva dentro del carril. Para ello, se generará el concepto de “velocidad automatizada”, que consistirá en incorporar una velocidad máxima para cada curva en función de su radio. Para radios por debajo de 400 metros, las velocidades máximas automatizadas están por debajo de las velocidades de circulación actuales, algo que, evidentemente, supone un problema.

- **Acuerdos convexos:**

En las curvas verticales convexas, cuando la geometría es más forzada en el acuerdo convexo, también existe el problema anteriormente comentado.

- **Visibilidad:**

Se está investigando qué ocurrirá cuando se implementen los denominados “*platooning*” o caravanas de camiones conectados en las autopistas, ya que esto supondrá un apantallamiento visual, no sólo para la visibilidad del conductor humano, sino que también para el alcance del funcionamiento del radar frontal en los sistemas de control de crucero adaptativo para la detección de obstáculos.

- **Sección transversal:**

Recientes estudios han demostrado que la anchura del carril es un factor muy importante para que funcionen los vehículos autónomos y debe comprenderse en un rango estandarizado: 2,6 metros como mínimo y 4,2 metros como máximo.

- **Zonas de parada por avería:**

Nace la necesidad de diseñar zonas de parada para resolver averías que sin duda sufrirán los futuros vehículos automatizados.

Señalización:

En ámbito europeo el año 2019 se publicó la modificación de la directiva de gestión de la seguridad vial (SV 2008/96/CE) que, por primera vez, incorporaba la integración del vehículo autónomo, analizando todos los aspectos de éste para mejorar la seguridad vial. Dentro de ese ámbito, se creó un grupo de expertos en seguridad viaria y, dentro de ese grupo, se creó también un subgrupo (EGRIS Sub-Group 1 Road Markings & Signs) orientado al análisis de la señalización actual para mejorarla y potenciar así la operatividad del vehículo autónomo. A continuación, se comentarán algunos ejemplos:

- **Señalización vertical**

Se han encontrado problemas con las señales dispuestas en las separaciones que existen entre calzadas principales de autopista y vías laterales conectoras o de servicio, o ramales de enlace. El problema radica cuando los sistemas de detección de señales obtienen la información de la vía incorrecta.

Otro problema detectado son las señales de “STOP” adelantadas, respecto a la posición donde realmente es óptima la detención del vehículo para una máxima visibilidad y verificar que pueda retomar la marcha. Por lo tanto, será necesario como mínimo añadirles a estas señales la línea en el suelo de detección en la posición óptima, y muy probablemente haya que modificar también dichas señales.



Figura 22. Problemas de señalización vertical. Fuente [29].

- **Señalización variable**

También existen problemas de incongruencia en cuanto a señalización variable, ya que hay disposiciones en las que, por ejemplo, cada carril de una autopista tiene el límite de velocidad sobre el propio carril, y a la vez, existen señales variables en paneles que deben adoptar todos los vehículos de la carretera independientemente del carril.

De la misma manera, también generarían confusión las señales de velocidad fijas en la vía, con la de los paneles que modifican la misma por alguna razón especial.



Figura 23. Problemas de señalización variable. Fuente [29].

- **Marcas viales**

En los últimos años se ha investigado experimentalmente tanto en Estados Unidos como en Australia y se ha llegado a determinar que hace falta, cómo mínimo, que las marcas viales tengan una anchura de 15 cm y una relación de contraste de 3/1 para garantizar el umbral mínimo de calidad de estas.

En este aspecto, se ha detectado que las marcas de los carriles deben tener continuidad en todo momento y no debe haber huecos. Así lo contempla también la nueva instrucción 8.2 de marcas viales españolas, aprobada recientemente.

Pavimento:

Cuando se realice una renovación del pavimento, ya no será posible la apertura al tráfico sin haber realizado previamente un premarcaje de las líneas. Y aún realizando dicho premarcaje, este no es suficiente para que los vehículos autónomos actuales lo detecten. Por lo tanto, existe una necesidad de investigación para nuevas técnicas de premarcaje, para garantizar el funcionamiento de vehículos autónomos.

Otro problema existente son las fisuras longitudinales de las carreteras que han sido selladas, ya que, debido al acabado de éstas, puede provocar, con la reflexión del sol, que el sistema las interprete como marcas viales y que se desconecte. De nuevo, habrá que determinar qué técnicas o materiales deben utilizarse para que no exista reflexión de luz y además el contraste sea el mínimo posible.

Finalmente, no todas las carreteras presentan las características suficientes para acoger a los sistemas automatizados de conducción. Por esta razón, va a necesitarse el desarrollo de un nuevo sistema de clasificación de carreteras que tenga en cuenta este nuevo condicionante como prioridad. De esta manera, se sistematizaría toda la red de carreteras, estableciendo por tramos cuál es el nivel máximo de automatización desplegable en cada tramo y cuál es el nivel mínimo de conectividad que necesitará el vehículo para poder utilizarlo.

7. Presupuesto

En lo referente al estudio económico del presente proyecto, se han tenido en cuenta los siguientes puntos para la valoración económica del mismo.

En primer lugar, se plasma la dedicación del ingeniero responsable de la elaboración del documento, incluyendo el tiempo dedicado a la búsqueda y obtención de la información. El coste por hora del ingeniero es de 40 €/hora, de acuerdo con la formación académica del responsable y el tipo de proyecto elaborado.

Además del trabajo realizado por el ingeniero, se deben tener en cuenta las amortizaciones, tanto de los dispositivos como los programas y/o herramientas empleados, mencionados a continuación:

- Amortización de PC con valor de compra de 720 € a 4 años de vida útil, resultando una amortización mensual de 15 €.
- Amortización de software a 1 año por caducidad de licencias.
- Amortización del uso de conexión a internet correspondiente a 3 mensualidades.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO [€]	IMPORTE [€]
Dedicación del ingeniero	Horas	300	40	12000
Amortización PC	Meses	3	15	45
Amortización conexión internet	Meses	3	30	90
Amortización software	Años	0,25	70	17,5
TOTAL				12.152,50 €

Tabla 1. Presupuesto. Fuente propia.

Por último, se añade el IVA correspondiente del 21%, al no estar sujeto a ningún tipo de IVA reducido, resultando un coste total del proyecto de **14.704,525 €**.

Conclusiones

A lo largo de todo este Trabajo de Fin de Máster se ha comprobado que la evolución tecnológica para poder implantar el coche autónomo con máxima autonomía es casi una realidad desde el punto de vista de ingeniería, y sin embargo, queda muchísimo por hacer hasta que pueda implantarse en nuestra sociedad, ya que otros aspectos transversales como la toma de decisiones mediante inteligencia artificial, el elevado coste de los sistemas redundantes de percepción, la homologación, la propia infraestructura y los aspectos legales y éticos siguen sin estar bien definidos ni regulados.

Alcanzar un estándar ético válido para todos a nivel mundial será una tarea muy difícil para resolver por parte de gobiernos, fabricantes e instituciones que deben cooperar en la implementación de medidas que pretendan reducir el porcentaje de escenarios donde el vehículo, mediante algoritmos estandarizados, pueda tomar una decisión determinista sin estar sujeta a la ética.

Estamos viviendo una etapa de difícil transición entre el vehículo convencional y el vehículo autónomo y es muy importante que se establezcan las bases y la confianza necesaria para afrontarlo con éxito en el futuro, teniendo muy claro el nivel actual de cada vehículo para evitar accidentes por exceso de confianza en sistemas que todavía no están preparados u homologados para actuar sin la vigilancia del conductor, como los que existen a día de hoy en el mercado de un teórico nivel 3 en la escala de la SAE.

Por otro lado, debemos estar preparados para la llegada de la nueva tecnología, ya que tendrá importantes impactos en muchos aspectos de nuestra sociedad actual. Cambiará el concepto de propiedad privada actual y fomentará nuevos servicios de movilidad, como por ejemplo, vehículos de alquiler sin conductor. Afectará también a muchísimos otros ámbitos como a la economía, el uso de los suelos urbanos, el transporte público, la gestión del tráfico, la desaparición y creación de nuevos empleos, la seguridad, etc.

En los próximos años se deberá evolucionar el software y la arquitectura electrónica, ya que, a pesar de tener el hardware en unos niveles tecnológicos muy avanzados, para llegar a una conducción altamente automatizada será necesaria una capacidad de computación mayor y un modelo más central que integre todos los datos. Otro aspecto fundamental va a ser la homologación de los sistemas mediante simulaciones e inteligencia artificial, ya que resultará imposible realizar pruebas convencionales para la infinidad de posibles situaciones a las que deberán enfrentarse los nuevos vehículos.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Dr. D. Manuel Moreno Eguílaz por concederme la posibilidad de hacer este Trabajo de Fin de Máster bibliográfico debido a la COVID-19 bajo su supervisión, además de la paciencia, disponibilidad y ayuda recibida durante tantos años.

También quiero aprovechar la ocasión para dar las gracias a mis personas más cercanas, por estar a mi lado y ayudarme a sacar este trabajo adelante, en estos momentos tan duros que nos ha tocado vivir debido a la pandemia.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Rodrigo Díaz López. (2020, enero 21). El futuro de la conducción autónoma. [<https://www.atsistemas.com/es/blog/el-futuro-de-la-conduccion-autnoma>, 8 de octubre de 2020].
- [2] Aarón Pérez. (2017, agosto 1). ¿Qué es la conducción autónoma? [<https://periodismodelmotor.com/que-es-conduccion-autonoma-autopilot/169482/>, 8 de octubre de 2020].
- [3] Carlos García Oliva. (2018, agosto 13). Historia del coche autónomo. [<https://www.autonocion.com/historia-coche-autonomo/>, 10 de octubre de 2020].
- [4] José María López. (2020, agosto 15). Origen e historia del vehículo autónomo. [<https://hipertextual.com/2020/08/origen-historia-vehiculo-autonomo>, 10 de octubre de 2020].
- [5] Helena Celdrán. (2012, septiembre 20). Norman Bel Geddes, diseñador de un futuro aerodinámico. [<https://www.20minutos.es/noticia/1591770/0/norman-bel-geddes/disenio/futurama/>, 10 de octubre de 2020].
- [6] Janosch Delcker (2018, julio 19). The man who invented the self-driving car. [<https://www.politico.eu/article/delf-driving-car-born-1986-ernst-dickmanns-mercedes/>, 10 de octubre de 2020].
- [7] Grupo de investigadores INTRAS. INFORME Coche autónomo seguridad vial y formación de conductores INTRAS-CNAE. [<https://www.cnae.com>, 11 de octubre de 2020].
- [8] Blog online km77. Conducción autónoma. Niveles y tecnología. [<https://www.km77.com/reportajes/varios/conduccion-autonoma-niveles>, 11 de octubre de 2020].
- [9] Ibáñez (2017, septiembre 30). Qué es un LIDAR, y cómo funciona el sensor más caro de los coches autónomos. [<https://www.motorpasion.com/tecnologia/que-es-un-lidar-y-como-funciona-el-sistema-de-medicion-y-deteccion-de-objetos-mediante-laser>, 12 de octubre de 2020].

- [10] Teresa Pinilla Alonso (2019). El automóvil 4.0. [Universidad de Sevilla, 14 de octubre de 2020]
- [11] A. Gil (2020, diciembre 6). Coches autónomos: se retrasa su implementación, pero están más cerca de lo que parece. [<https://www.20minutos.es/motor/noticia/4499525/0/coches-autonomos-se-retrasa-su-implementacion-pero-estan-mas-cerca-de-lo-que-parece/>, 3 de enero de 2021]
- [12] Beatriz Treceño (2020, noviembre 26). La llegada del coche autónomo se retrasa por la pandemia. [<https://www.expansion.com/economia/2020/11/26/5fbed2e2468aebb66b8b45fe.html>, 3 de enero de 2021]
- [13] David Galán (2020, enero 5). Bosch da un nuevo empujón al coche autónomo: presentará en el CES de Las Vegas un sensor LIDAR más económico. [<https://www.motorpasion.com/tecnologia/bosch-da-nuevo-empujon-al-coche-autonomo-presentara-ces-vegas-sensor-lidar-economico>, 4 de enero de 2021]
- [14] Javier Jiménez (2018, abril 26). El mayor estudio sobre la ética de los coches autónomos. [<https://www.xataka.com/automovil/el-mayor-estudio-sobre-la-etica-de-los-coches-autonomos-trae-malas-noticias-para-los-ancianos-e-incertidumbre-para-la-industria>, 4 de enero de 2021]
- [15] Jordi Moral (2020, julio 2). Los coches autónomos, ¡limitados a 60 km/h y con cajas negras! [https://www.autopista.es/noticias-motor/los-coches-autonomos-limitados-a-60-km-h-y-con-cajas-negras-y-sin-peatonos-ni-bicis-cerca_159357_102.html, 4 de enero de 2021].
- [16] Jordi-Maria d'Arquer (2020, junio 26). Entre el Mal y la Fe, una elección permanente. [<https://www.forumlibertas.com/entre-el-mal-y-la-fe-una-eleccion-permanente/>, 4 de enero de 2021]
- [17] Reglamento DGT España. [<http://www.dgt.es>, 5 de enero de 2021]
- [18] Alber Callejo (2020, agosto 19). Tesla lanzará el hardware 4.0 del Autopilot en 2021. [<https://forococheelectricos.com/2020/08/tesla-hardware-4-0-autopilot-2021.html>, 5 de enero de 2021]
- [19] Tesla Autopilot [https://www.tesla.com/es_ES/autopilot, 4 de enero de 2021]
- [20] David Galán (2020, octubre 13). Así son los taxis sin conductor de Waymo [<https://www.motorpasion.com/tecnologia/asi-taxis-conductor-waymo-video-servicio->

coches-autonomos-pedido-esta-marcha, 3 de enero de 2021]

- [21] Antonio (2020, diciembre 15). Zoox, así es el coche autónomo de Amazon. [<https://somoselectricos.com/zoox-coche-electrico-autonomo-amazon/>, 5 de enero de 2021]
- [22] Montserrat Valle Vargas (2020, diciembre 15). Amazon también tiene su propio coche autónomo: Zoox no se venderá al público, pero quiere competir con DiDi y Uber [<https://www.xataka.com.mx/vehiculos/amazon-tambien-tiene-su-propio-coche-autonomo-zoox-no-se-vendera-al-publico-quiere-competir-didi-uber>, 5 de enero de 2021]
- [23] Ebenizer Pinedo (2019, junio 12). Uber y Volvo presentan su primer coche totalmente autónomo. [<https://hipertextual.com/2019/06/uber-volvo-presentan-su-primer-coche-totalmente-autonomo>, 5 de enero de 2021]
- [24] Raúl Álvarez (2018, enero 20). GM Cruise AV: así el primer coche autónomo sin volante ni pedales que quiere salir a las calles en 2019. [<https://www.xataka.com/automovil/gm-cruise-av-asi-el-primer-coche-autonomo-sin-volante-ni-pedales-que-quiere-salir-a-las-calles-en-2019>, 5 de enero de 2021]
- [25] Cristian Rus (2020, enero 22). Cruise Origin ya es oficial, el coche autónomo sin volante y sin controles de General Motors. [<https://www.xataka.com/vehiculos/cruise-origin-oficial-coche-autonomo-volante-controles-general-motors>, 5 de enero de 2021]
- [26] Rodrigo Pareja (2020, junio 19). Ford ofrecerá en 2021 un sistema para conducir sin manos en autopista. [<https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a32913007/conduccion-autonoma-ford-tecnologia/>, 5 de enero de 2021]
- [27] Denís Iglesias (2018, marzo 19). Primer atropello mortal de un vehículo sin conductor. [<https://www.elmundo.es/motor/2018/03/19/5aaff150e2704ec82e8b463f.html>, 5 de enero de 2021]
- [28] Javier Costas (2020, febrero 11). Emergen detalles del primer accidente mortal de un Tesla Model X con Autopilot. [<https://www.motor.es/noticias/emergen-detalles-del-primer-accidente-mortal-de-un-tesla-model-x-con-autopilot-202064787.html>, 5 de enero de 2021]
- [29] Webinar ASEPA (2020, noviembre 25). Vehículos autónomos y conectados en el futuro modelo de transporte.
- [30] Lukas Neckermann, The Mobility Revolution, 2015.