



universidad
de león

UNIVERSIDAD DE LEÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL, INFORMÁTICA Y AEROESPACIAL

**AUTOMATIZACIÓN DEL TRÁFICO: DISEÑO
CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE
AUTOMATIZADO, ANÁLISIS LEGISLATIVO, NUEVO
MODELO DE MOVILIDAD E IMPACTO EN LA ECONOMÍA
NACIONAL**

Tesis doctoral desarrollada por

EFRÉN ALONSO FERNÁNDEZ

Tutor y Director I de la tesis doctoral

DR. RAMÓN ÁNGEL FERNÁNDEZ DÍAZ

Director II de la tesis doctoral

DR. MARIANO NIETO ANTOLÍN

Para el cumplimiento de los requerimientos para

**DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE LEÓN EN EL PROGRAMA DE DOCTORADO DE
INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN Y COMPUTACIÓN**

León, septiembre de 2021



universidad
de león

UNIVERSITY OF LEÓN

SCHOOL OF INDUSTRIAL, COMPUTER AND AEROSPACE ENGINEERING

**TRAFFIC AUTOMATION: CONCEPTUAL DESIGN OF AN
AUTOMATED TRANSPORTATION SYSTEM,
LEGISLATIVE ANALYSIS, NEW MOBILITY MODEL AND
IMPACT ON THE NATIONAL ECONOMY**

A dissertation submitted by

EFRÉN ALONSO FERNÁNDEZ

Supervised by

DR. RAMÓN ÁNGEL FERNÁNDEZ DÍAZ

and

DR. MARIANO NIETO ANTOLÍN

In fulfillment of the requirements for the Degree of

DOCTOR OF PHILOSOPHY (Ph.D.)

In León, September 2021



RESUMEN EJECUTIVO

La navegación autónoma se presenta como la mayor revolución en la historia del transporte, debido a que los últimos avances científicos conseguidos avalan décadas de investigación en un sector con el potencial para solucionar los graves problemas del actual sistema de transporte. Sin embargo, la existencia de un elevado número de vehículos autónomos navegando en un mismo escenario plantea cuestiones y retos muy relevantes que aún no han sido resueltos. El trasfondo de esta cuestión es la automatización del tráfico en su conjunto. Las diferencias entre la automatización completa de un vehículo y la automatización del tráfico son muchas y notables.

La investigación realizada en esta tesis analiza en profundidad la automatización del tráfico a nivel nacional, los retos científicos y tecnológicos, así como las implicaciones y consecuencias legislativas, económicas y sociales. Se presenta un modelo conceptual de sistema automatizado de transporte, diseñado para una movilidad en la que los sistemas autónomos reemplazan a las personas en la navegación. Es un sistema fundamentado en tres elementos principales que son: la gestión automatizada del tráfico, ejecutada por los Centros de Control del Tráfico (CCT), los ingenios autónomos, encargados de realizar las misiones propias del transporte, y una red de comunicaciones dedicada a la movilidad automatizada, o Red S3. La combinación de estos elementos permite la generación de un nuevo espacio radioeléctrico, el denominado Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu), con importantes implicaciones operativas y comerciales. El sistema de transporte automatizado se caracteriza por la intermodalidad, integrando la navegación autónoma terrestre, aérea y marina.

Automatizar el tráfico de un país, en este caso España, tiene importantes connotaciones jurídicas y administrativas. Se analizan los paradigmas fundamentales que definirán la nueva legislación que será necesaria para una movilidad automatizada. El proceso legislativo se estructurará en diferentes fases, en las que se irán escalando las acciones regulatorias. Se evalúa la estructura administrativa del transporte actual en España, identificando los organismos y entidades que deberán ejecutar estas acciones legislativas.

El impacto de la automatización en la movilidad también será muy importante. Se presenta un estudio en base a datos de movilidad reales de una ciudad de referencia, y los resultados obtenidos muestran la magnitud de esta revolución. La irrupción de los sistemas autónomos inteligentes permite redefinir las funcionalidades de los ingenios. En situaciones ideales se podría reducir el parque móvil por encima del 90%, satisfaciendo completamente la demanda de movilidad. Además, se puede llegar a duplicar la velocidad media de circulación en los núcleos urbanos. De igual modo, el impacto en la economía nacional es elevadísimo. Se han analizado los sectores más afectados, que representan el 38,16% del PIB de España. Las consecuencias de la automatización del tráfico en cada uno de ellos son muy grandes, en unos casos positivas y en otros negativas.

La automatización del tráfico permite un modelo de movilidad sostenible, eficiente y seguro. Redefine los patrones y reglas de tráfico, pasando del tráfico por lotes al tráfico de flujos. Y también proporciona una movilidad bajo demanda e intermodal, dando lugar a una nueva estructura económica y permitiendo la recuperación de las ciudades para las personas.



ABSTRACT

Autonomous navigation is presented as the greatest revolution in the history of transportation because the latest scientific advances achieved endorse decades of research in a sector with the potential to solve the serious problems of the current transportation system. However, the existence of a large number of autonomous vehicles navigating in the same scenario raises very relevant issues and challenges that have not yet been resolved. The background to this issue is the traffic automation. The differences between achieving fully autonomous vehicles and achieving traffic automation are many and significant.

The research conducted in this thesis analyzes in depth the automation of the traffic at the national level, the scientific and technological challenges, as well as the legislative, economic and social implication and consequences. It presents a conceptual model of an automated transportation system designed for a mobility model in which autonomous systems replace people in navigation. It is a system based on three main elements: automated traffic management, executed by Traffic Control Centers (TCCs), autonomous vehicles, in charge of performing transport missions, and a communications network dedicated to autonomous mobility, or S3 Network. The combination of these elements allows the generation of a new radio space, the so-called Multidimensional Automated Space (MAS), with important operational and commercial implications. This automated transportation system is characterized by intermodality, integrating autonomous land, air and marine navigation.

Automating a country's traffic, in this case Spain, has important legal and administrative connotations. The fundamental paradigms that will define the new legislation that will be necessary for automated mobility are analyzed. The legislative process will be structured in different phases in which regulatory actions will be scaled. The current administrative structure of transport in Spain is evaluated, identifying the organizations and entities that will have to execute this legislative actions.

The impact of automation on mobility will also be very important. A study is presented in a reference city based on real mobility data, and the results obtained show the magnitude of this revolution. The advent of intelligent autonomous systems makes it possible to redefine the functionalities of the vehicles. In ideal situations, the vehicle fleet could be reduced by more than 90% to meet the demand for mobility, doubling the average speed of traffic in urban areas. Similarly, the impact on the national economy is extremely high. The most affected sectors have been analyzed, representing 38,16% of Spain's GDP. The consequences of traffic automation in each of them are very important, in some cases very positive and in others very negative.

Traffic automation enables a sustainable, efficient and safe mobility model, redefining traffic patterns and rules, moving from batch traffic to flow traffic, providing on-demand and intermodal mobility, giving rise to a new economic structure and allowing the recovery of cities for people.



ÍNDICE

Resumen ejecutivo	i
Abstract.....	ii
Índice	iii
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	x
1. Introducción	11
1.1. Motivación.....	11
1.2. Alcance de la tesis.....	12
1.3. Objetivos de la investigación	12
1.4. Contribuciones de la investigación	13
1.5. Organización de la tesis.....	15
2. Estado del Arte	16
2.1. Problemática del transporte actual	16
2.1.1. Contaminación.....	16
2.1.2. Siniestralidad	18
2.1.3. Congestión	18
2.2. Historia del transporte y los ingenios autónomos.....	20
2.2.1. Transporte	20
2.2.2. Conducción Autónoma.....	25
2.2.3. Navegación Aérea Autónoma	27
2.2.4. Navegación Marina Autónoma.....	30
2.2.5. Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS)	32
2.3. Legislación en materia de ingenios autónomos	34
2.3.1. Legislación de la Conducción Autónoma.....	35
2.3.1.1. Regulación Internacional.....	35
2.3.1.2. Regulación en España	37
2.3.2. Legislación de la Navegación Aérea Autónoma	38
2.3.2.1. Regulación Internacional.....	38
2.3.2.2. Regulación en España	40
2.3.3. Legislación de la Navegación Marina Autónoma.....	41
3. Análisis de la Revolución Tecnológica en el Transporte y Planteamiento Teórico de la Tesis	43
3.1. Nueva Era del Transporte (NERTRA).....	45



3.2. Hipótesis	49
3.3. Transición	50
3.4. Planteamiento teórico	53
4. Automatización del Tráfico.....	55
4.1. Análisis de las capacidades y prestaciones de los vehículos completamente autónomos en la actualidad	56
4.1.1. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos terrestres	57
4.1.2. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos aéreos.....	61
4.1.3. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos marinos	67
4.2. Automatización del vehículo vs Automatización del tráfico.....	68
5. Diseño Conceptual de un Sistema de Transporte Automatizado.....	71
5.1. Gestión automatizada del tráfico	73
5.1.1. La gestión del tráfico en la actualidad	73
5.1.1.1. Gestión del tráfico rodado	73
5.1.1.2. Gestión del tráfico aéreo	74
5.1.1.3. Gestión del tráfico marítimo.....	77
5.1.1.4. Gestión convencional del tráfico vs Gestión automatizada del tráfico.....	78
5.1.2. Funcionalidades y requisitos de la gestión automatizada del tráfico.....	79
5.1.2.1. Planificación y gestión de rutas	80
5.1.2.2. Control, gestión y monitorización de ingenios	81
5.1.2.3. Atributos de autoridad	81
5.1.2.4. Triple Click y gestión de preferencias	82
5.1.2.5. Gestión de operadores y usuarios	83
5.1.2.6. Gestión de infraestructuras	84
5.1.2.7. Gestión de la red de comunicaciones.....	84
5.1.2.8. Capacidad de comunicación con otros sistemas e infraestructuras de transporte	84
5.1.2.9. Capacidad de auto análisis	85
5.1.3. Centros de Control del Tráfico	85
5.1.3.1. Centros de Procesamiento de Datos	86
5.1.3.2. Salas de Control de Tráfico	91
5.1.4. Estructura de gestión	92
5.1.4.1. Arquitectura genérica del CCT	92
5.1.4.2. Procesos de la gestión automatizada del tráfico.....	94
5.2. Ingenios Autónomos	103
5.2.1. Sistema autónomo de los ingenios	104



5.2.1.1. Entorno de navegación	104
5.2.1.2. Sensores.....	109
5.2.1.3. Subsistema de posicionamiento	109
5.2.1.4. Subsistema de comunicaciones	111
5.2.1.5. Subsistema de percepción.....	111
5.2.1.6. Subsistema de planificación	113
5.2.1.7. Subsistema de control	114
5.2.1.8. Subsistema de estado	115
5.2.2. Estructura del sistema autónomo de los ingenios	116
5.2.2.1. Arquitectura genérica del sistema autónomo	117
5.2.2.2. Procesos principales del sistema autónomo.....	117
5.2.3. Caracterización y particularidades del sistema autónomo en los diferentes modos de transporte.....	125
5.2.3.1. Sistema autónomo para los ingenios terrestres	125
5.2.3.2. Sistema autónomo para ingenios aéreos	129
5.2.3.3. Sistema autónomo para ingenios marinos.....	132
5.3. Red de comunicaciones.....	135
5.3.1. Redes de comunicaciones en la actualidad	135
5.3.1.1. Tecnologías de comunicación para vehículos autónomos	138
5.3.2. Funcionalidades y requisitos de la Red S3.....	142
5.3.2.1. Software Defined Network (SDN)	145
5.3.2.2. Network Function Virtualization (NFV).....	146
5.3.3. Red de comunicaciones de ingenios	147
5.3.3.1. Comunicaciones entre ingenios (I2I).....	148
5.3.3.2. Comunicaciones de ingenio a todo (I2X).....	152
5.3.4. Red de posicionamiento	153
5.3.4.1. Sistemas de posicionamiento actuales	154
5.3.4.2. Arquitecturas de posicionamiento	155
5.3.4.3. Funcionalidades y requisitos del sistema de posicionamiento	158
5.3.4.4. Arquitectura del sistema de posicionamiento POX	158
5.3.5. Infraestructura de la Red S3	161
5.3.5.1. Red de geobalizas	162
5.3.5.2. Servicios de la Red S3	165
5.3.6. Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu)	175
6. Estructura Administrativa del Transporte en España y Legislación Necesaria para la Implementación del Sistema de Transporte Automatizado.....	177



6.1. Estructura Administrativa del Transporte Actual en España	177
6.1.1. Organización del Transporte Terrestre	178
6.1.1.1. Transporte por Carretera	180
6.1.1.2. Transporte Ferroviario.....	184
6.1.2. Organización del Transporte Aéreo.....	185
6.1.3. Organización del Transporte Marítimo	188
6.1.4. Estructura del Transporte en España	191
6.2. Análisis Legislativo para el despliegue e implementación de un Sistema de Transporte Automatizado	192
6.2.1. Estudio del proceso legislativo	192
6.2.1.1. Etapa de experimentación.....	192
6.2.1.2. Etapa de transición legislativa	193
6.2.1.3. Etapa de consolidación legislativa	195
6.2.2. Paradigmas legislativos de la automatización del transporte	195
6.2.2.1. La movilidad es un derecho civil	196
6.2.2.2. No neutralidad tecnológica	197
6.2.2.3. Nube Soberana	198
6.2.2.4. Preservar la ciudad como activo cívico	198
7. Análisis de la Evolución de la Movilidad en una Ciudad de Referencia	200
7.1. Características de la ciudad de León que determinan los patrones actuales de movilidad	200
7.1.1. Indicadores poblacionales	201
7.1.2. Indicadores económicos.....	202
7.1.3. Indicadores del parque móvil	203
7.2. Radiografía de la movilidad actual en la ciudad de León.....	204
7.3. Análisis del impacto del Sistema de Transporte Automatizado en la movilidad de la ciudad de León	206
7.3.1. Herramienta de simulación	207
7.3.2. Criterios de diseño de la simulación	208
7.3.3. Resultados obtenidos	209
8. Estudio del Impacto Económico del Sistema de Transporte Automatizado en la Economía de España	212
8.1. Metodología	212
8.2. Resultados obtenidos	213
8.2.1. Previsiones generales.....	213
8.2.2. Análisis de los diferentes sectores	216
8.2.2.1. Industria de la automoción	216



8.2.2.2. Industria de equipos y componentes	218
8.2.2.3. Transporte de mercancías	218
8.2.2.4. Transporte de personas.....	219
8.2.2.5. Seguros de no vida.....	220
8.2.2.6. Industria de reparación y mantenimiento	221
8.2.2.7. Profesionales del transporte	222
8.2.2.8. Nueva industria tecnológica	222
8.2.2.9. Salud	223
8.2.2.10. Combustibles fósiles	224
8.2.2.11. Infraestructuras	225
8.2.2.12. Urbanismo.....	226
9. Implicaciones y Beneficios del Sistema de Transporte Automatizado	227
9.1. Sostenibilidad.....	227
9.2. Seguridad	228
9.3. Redefinición de los Patrones de Movilidad y Reglas del Tráfico.....	230
9.4. Del Tráfico por Lotes al Tráfico de Flujos	232
9.5. Triple Click para la Gestión de Emergencias.....	235
9.6. Movilidad Integral Bajo Demanda	236
9.7. Intermodalidad	237
9.8. Nueva estructura económica en el transporte.....	238
9.9. Recuperación de las ciudades para las personas.....	240
10. Conclusiones y Líneas Futuras.....	241
10.1. Conclusiones.....	241
10.2. Líneas futuras.....	244
Bibliografía.....	247
Agradecimientos	261
ANEXO I. Publicación Científica que avala la Tesis Doctoral.....	263



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Comparación de la transición del coche de caballos al automóvil de combustión en la ciudad de Nueva York [106].....	44
Figura 3. 2. Fases de la Transición NERTRA.	52
Figura 4. 1. Comparación de los paradigmas de la automatización del vehículo y la automatización del tráfico.....	70
Figura 5. 1. Representación conceptual del sistema automatizado de transporte.	72
Figura 5. 2. Estrategia de distribución de pocos CPD de gran tamaño.	87
Figura 5. 3. Estrategia de distribución de muchos CPD de pequeño tamaño.	88
Figura 5. 4. Arquitectura genérica del Centro de Control de Tráfico (CCT).....	93
Figura 5. 5. Arquitectura del proceso de solicitud, gestión y asignación de rutas por parte del Centro de Control de Tráfico.....	96
Figura 5. 6. Arquitectura del proceso de modificación de rutas por parte del Centro de Control de Tráfico.	100
Figura 5. 7. Arquitectura del proceso de gestión de emergencias por el Centro de Control de Tráfico.	101
Figura 5. 8. Arquitectura genérica del sistema autónomo de un ingenio.	116
Figura 5. 9. Arquitectura del proceso de percepción del entorno y situación de conciencia del ingenio.....	118
Figura 5. 10. Arquitectura genérica del proceso de cálculo de ruta de un ingenio.....	121
Figura 5. 11. Arquitectura genérica del proceso de cambio de ruta realizado por parte de un ingenio.....	124
Figura 5. 12. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio terrestre.	127
Figura 5. 13. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio aéreo con configuración de ala fija.....	131
Figura 5. 14. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio marino.	133
Figura 5. 15. Emisión omnidireccional de posicionamiento en la arquitectura POX.	159
Figura 5. 16. Reenvío de la señal de posicionamiento de las BEs hacia la BM.	160
Figura 5. 17. Proceso de recepción de señales de posicionamiento procedentes del ingenio y las BEs por parte de la BM.....	160
Figura 5. 18. Representación gráfica del Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu).	175
Figura 6. 1. Estructura administrativa del transporte terrestre en España.	180
Figura 6. 2. Estructura administrativa del transporte aéreo en España.	186
Figura 6. 3. Estructura administrativa del transporte marítimo en España.	190
Figura 6. 4. Estructura administrativa del transporte en España.	191
Figura 7. 1. Red viaria del Área Metropolitana de León en la herramienta CGN.	207
Figura 7. 2. Sectorización e identificación de los centros de atracción y generación de viajes en la herramienta CGN.	208
Figura 7. 3. Simulación parcial de flujos de tráfico en la herramienta CGN.	210
Figura 8. 1. Evolución del movimiento de mercancías (en toneladas) transportadas por aire [212].	213
Figura 8. 2. Evolución del índice de precio del consumidor de transporte [212].	214
Figura 8. 3. Previsión de la evolución del PIB de la industria de la automoción [212].	217



Figura 8. 4. Previsión de la evolución del PIB de la industria de equipos y componentes [212]. 218

Figura 8. 5. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector del transporte de mercancías [212]. 219

Figura 8. 6. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector del transporte de pasajeros [212]. 220

Figura 8. 7. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector de los seguros de no vida [212]. 221

Figura 8. 8. Previsión de la evolución del impacto en el PIB en la industria tecnológica nacional [212]. 223

Figura 8. 9. Previsión de la evolución del impacto en el PIB en el sector de la salud asociado al tráfico [212]. 224

Figura 8. 10. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector de los combustibles fósiles [212]. 225

Figura 8. 11. Coste medio de tecnificación de las infraestructuras para el despliegue del sistema de transporte automatizado [212]. 225

Figura 9. 1. Comparación de capacidad de gestión de una intersección convencional y una intersección inteligente del Sistema de Transporte Automatizado. 233

Figura 9. 2. Tráfico de flujos en una intersección inteligente del Sistema de Transporte Automatizado. 234

Figura 9. 3. Comparación del movimiento de un vehículo de emergencia convencional con un ingenio de emergencia en el Sistema de Transporte Automatizado 236



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1. Características de los niveles de automatización SAE de los vehículos.	58
Tabla 4. 2. Roles desempeñados por el usuario y por el sistema autónomo en el nivel 4 SAE de conducción autónoma.	59
Tabla 4. 3. Roles desempeñados por el usuario y por el sistema autónomo en el nivel 5 SAE de conducción autónoma.	60
Tabla 4. 4. Características operativas de los diferentes tipos de UAVs.	63
Tabla 4. 5. Niveles de autonomía de las aeronaves no tripuladas según el AFRL Autonomy Framework.	64
Tabla 4. 6. Descripción de los diferentes niveles de autonomía de los sistemas marinos no tripulados.	67
Tabla 5. 1. Clasificación TIER para Centros de Datos [139].	87
Tabla 7. 1. Evolución de la población del área metropolitana de León [208].	201
Tabla 7. 2. Indicadores poblacionales ciudad de León [207].	202
Tabla 7. 3. Indicadores económicos de la ciudad de León [207].	202
Tabla 7. 4. Indicadores del parque móvil de la ciudad de León [207].	203
Tabla 7. 5. Evolución del parque móvil provincia de León [209].	203
Tabla 7. 6. Indicadores de la movilidad actual en la ciudad de León [207].	204
Tabla 7. 7. Distribución de viajes según el modo de transporte utilizado en la movilidad actual de León [207].	205
Tabla 7. 8. Indicadores de la movilidad actual en transporte privado en León [207].	205
Tabla 7. 9. Resultado de la optimización de la flota de ingenios en la ciudad de León. ...	210
Tabla 8. 1. Evolución del parque móvil en función de los diferentes escenarios de la transición [212].	215
Tabla 8. 2. Evolución del impacto en el PIB (en millones de €) de los diferentes sectores analizados en los tres escenarios de la transición [212].	215



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La popularización de los vehículos autónomos en los últimos años ha puesto en boca de la sociedad un sector que tiene varias décadas de investigación y desarrollo. El anhelo por conseguir vehículos no tripulados no es nuevo, es un viejo deseo que tiene la humanidad, con varios intentos y prototipos que datan de siglos atrás. La diferencia es que los desarrollos e innovaciones de estas últimas décadas han permitido obtener las tecnologías que permiten dotar a estos vehículos autónomos de los niveles de seguridad y eficiencia necesarios, como plantearse que reemplacen a las personas en las tareas de navegación.

Adicionalmente, los demostradores y pruebas que se han realizado en escenarios reales han confirmado las expectativas que se les imaginaba a estos vehículos con relación a su potencial para remediar alguno o varios de los graves problemas que presenta el actual sistema de transporte, como pueden ser la contaminación, la congestión o la siniestralidad. Los resultados alentadores han motivado el crecimiento exponencial de las investigaciones e inversiones realizadas en este sector emergente.

Los vehículos no tripulados o autónomos se han desarrollado sobre diferentes modos de transporte, como los terrestres, aéreo o marino, si bien es cierto que sus avances, nivel de desarrollo, utilización real o historia difiere bastante de uno a otro. Otra tendencia que se ha seguido con estos nuevos vehículos ha sido la compartimentación tradicional propia del transporte, es decir, una estructura y organización muy definida para cada modo de transporte (tierra, mar y aire), donde los protocolos o estándares comunes brillan por su ausencia.

Sin cuestionar el avanzado nivel de desarrollo conseguido por los actuales vehículos autónomos, que es muy elevado, sí es cierto que aún falta trabajo por realizar para alcanzar el ansiado nivel de autonomía óptimo. La automatización completa de los vehículos es una cuestión que sigue generando controversia, y presenta una serie de preguntas que aún no se han resuelto.

Enmarcado en este contexto, el trabajo de investigación de esta tesis busca aportar respuestas a todas estas preguntas o cuestiones que aún no se han resuelto con relación a la automatización completa de los vehículos.

Los resultados positivos que demuestran las capacidades de los vehículos autónomos permiten asumir la generalización y masificación de estas tecnologías dentro del mundo del transporte. En el momento que se asume esta tendencia, se presenta un escenario con cientos o miles de ingenios autónomos circulando, que podrían dar lugar a convertirse en la totalidad. Este escenario plantea la primera gran disyuntiva, las diferencias entre automatizar un vehículo y automatizar cientos, miles o millones de vehículos que convivan navegando. La cuestión de fondo es la automatización del tráfico, que aún no se ha planteado y se aborda en esta tesis.

Automatizar el tráfico representa un gran salto cualitativo en comparación al actual sistema de transporte. Se plantean numerosas implicaciones, necesidades y requisitos nuevos que los propios vehículos autónomos no son capaces de satisfacer por sí mismos. Surge



entonces la necesidad de diseñar un nuevo sistema de transporte automatizado, que proporcione una solución con las garantías de seguridad y eficiencia necesarias. Es conveniente tener esta visión en mente desde un comienzo, en lugar de seguir una ruta no planificada e improvisada en base a los desarrollos que se vayan realizando. Sabiendo que el tráfico se automatizará, y cómo ha de ser el sistema de transporte automatizado que lo posibilite, se podrán tomar mejores decisiones y estrategias en el proceso de transición hacia la nueva movilidad autónoma.

La magnitud del reto en cuestión permite abordar también la cuestión de la segmentación del transporte en los diferentes modos, orientando la investigación hacia una solución que permita la integración de ingenios terrestres, aéreos y marinos bajo un mismo sistema con estándares y protocolos compartidos, logrando la intermodalidad integral.

El transporte es una disciplina esencial en la actividad de cualquier país del mundo. Además de las cuestiones propias de la ingeniería y el desarrollo tecnológico, es fundamental analizar y estudiar las acciones legislativas, el impacto económico y las cuestiones sociales que tiene la automatización del tráfico.

1.2. Alcance de la tesis

La investigación realizada en esta tesis tiene un carácter teórico. Se pretende crear un modelo conceptual solvente que sirva de base para una posterior formalización e implementación práctica. Se aborda un reto de grandes dimensiones, como es la automatización del tráfico. El nivel de complejidad es altísimo en todos los aspectos fundamentales que se tratan.

Por tanto, alcance de la tesis doctoral se limita al marco teórico de estudio, presentando un nivel conceptual básico de un sistema de transporte automatizado, que permita la automatización integral del transporte de un país. El propósito es establecer las bases conceptuales y teóricas para posteriores desarrollos y diseños en detalle de las diferentes partes, elementos y áreas del sistema presentado, que permitan dar el siguiente paso hasta la creación de demostradores y prototipos en escenarios reales, para su posterior escalabilidad. Igualmente, las simulaciones realizadas, los estudios y los resultados obtenidos tienen un carácter teórico en los marcos tecnológicos, económicos, legislativos y sociales.

La lectura de esta tesis tiene interés para quienes se planteen automatizar el transporte de un determinado territorio, bien sea desde una perspectiva política, empresarial o de investigación aplicada. Los resultados de esta investigación tienen el fin de analizar en profundidad todos los aspectos fundamentales implicados en el proceso de automatización de una disciplina como el transporte. Se aporta el marco inicial de referencia que permite establecer y planificar una hoja de ruta a seguir para alcanzar la movilidad autónoma integral en un territorio o de un país.

1.3. Objetivos de la investigación

El objetivo principal de esta tesis doctoral es la generación de un diseño conceptual de sistema de transporte que permita la automatización integral del transporte en los diferentes



contextos. Para alcanzar este objetivo general, se definen una serie de objetivos específicos:

- Estudio del actual sistema de transporte y la problemática que tiene asociada.
- Investigación de las capacidades actuales de los vehículos autónomos y sus objetivos y expectativas de automatización en los tres contextos: tierra, mar y aire.
- Análisis de las implicaciones y requisitos que tiene la automatización del tráfico en contraposición con la automatización de un vehículo, y el proceso de transición que se experimentará para pasar el actual modelo de transporte a una movilidad completamente autónoma.
- Definición de los principios de funcionamiento, elementos e infraestructuras necesarios para automatizar el transporte en un país, utilizando como criterios fundamentales la sostenibilidad, la eficiencia y la seguridad en el transporte.
- Diseño conceptual de un sistema de gestión automatizada del tráfico de ingenios que navegan de manera autónoma.
- Diseño conceptual de un sistema autónomo genérico, tanto para ingenios terrestres, aéreos y marinos, que se integre en la infraestructura general del sistema de transporte automatizado y permita alcanzar los estándares de seguridad y eficiencia necesarios.
- Diseño conceptual de una red de comunicaciones de altas prestaciones, dedicada exclusivamente al tráfico autónomo, que garantice la operatividad y las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema.
- Análisis de la estructura administrativa del transporte en España, que permita identificar a todos los organismos y entidades con competencias en esta materia, que se verán implicados en el desarrollo de la legislación necesaria para la implementación de un sistema de estas características.
- Estudio del impacto que tendrá la implementación del sistema de transporte automatizado diseñado en una ciudad de referencia, en base a datos de movilidad reales.
- Estudio del impacto económico que tendrá la implementación del sistema de transporte automatizado diseñado en la economía de un país, España, estructurado en diferentes etapas, y evaluando el impacto en los sectores más afectados.
- Evaluación y análisis de las principales implicaciones que tendrá la automatización del tráfico y exposición de los beneficios y ventajas más relevantes.

1.4. Contribuciones de la investigación

Se presenta una sinopsis de las principales contribuciones que aporta esta tesis doctoral:

- I. Se ha realizado un estudio integral de la historia, capacidades, características, presentaciones, legislación y nivel de desarrollo de los vehículos autónomos, tanto terrestres, aéreos como marinos.
- II. Es la primera investigación que plantea la automatización completa del tráfico de un país, analizando en profundidad las diferencias entre la automatización de un vehículo y la automatización del conjunto del tráfico (incluyendo ingenios terrestres, aéreos y marinos).



- III. Se presenta una estructura por fases del proceso de transición necesario para implementar progresivamente el sistema de transporte automatizado que permita el objetivo final de la automatización del conjunto del tráfico.
- IV. Definición de los requisitos globales que ha de tener un sistema de transporte automatizado y definición de una infraestructura formada por tres elementos principales: la gestión automatizada del tráfico, los ingenios y la red de comunicaciones.
- V. Diseño de un Centro de Control de Tráfico que permita la gestión automatizada del tráfico, con una estructura distribuida con gestión centralizada. Se presenta la estrategia de distribución y el dimensionamiento de la infraestructura a nivel nacional. Se presenta la arquitectura genérica de funcionamiento y el desarrollo de los principales procesos de gestión. Incorpora nuevas capacidades y títulos jurídicos asociados como el Triple Click o el Tercero Autorizado.
- VI. Se presenta una nueva arquitectura genérica de funcionamiento para los sistemas autónomos de ingenios, común a ingenios aéreos, terrestres y marinos, que permite su perfecta integración y cooperación en el mismo sistema de gestión. Es una arquitectura formada por ocho subsistemas principales. El diseño de la arquitectura identifica los procesos principales, como la percepción del entorno, la obtención de la situación de conciencia, el cálculo de ruta o el cambio de ruta.
- VII. Diseño de una red de comunicaciones dedicada exclusivamente al transporte autónomo, que garantiza las comunicaciones entre los ingenios y la gestión automatizada del tráfico y permite obtener la posición de estos ingenios. Incorpora nuevas capacidades y títulos jurídicos como el Segundo Testimonio o los sellos de tiempo. Se organiza en una red de comunicaciones de ingenios y una red de posicionamiento con una arquitectura TDOA asíncrona e inversa. Además, incorpora una serie de servicios complementarios a los dos principales, que incrementan sus funcionalidades y aplicaciones en escenarios reales.
- VIII. Se define un nuevo concepto, el Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu), derivado del funcionamiento conjunto de la gestión automatizada del tráfico y la red de comunicaciones, que permite garantizar la operatividad del sistema y comercializar los diferentes servicios proporcionados por esta infraestructura automatizada de transporte.
- IX. Se ha realizado un análisis completo de la estructura administrativa del transporte en España, y se ha organizado el proceso legislativo necesario para la implementación en el país del sistema de transporte automatizado. Se han definido los principales paradigmas legislativos en los que se deben sostener las nuevas regulaciones.
- X. Se presenta un estudio de movilidad en una ciudad de referencia, León, realizado en base a datos reales del comportamiento de los ciudadanos, reemplazando en simulación el actual parque móvil por ingenios, funcionando con los criterios de la automatización del tráfico, y se ha obtenido una solución para el problema de la flota mínima ideal. Los datos obtenidos son muy relevantes para realizar estudios y extrapolaciones a mayor escala.
- XI. La investigación aporta el primer estudio que se realiza en España sobre el impacto en la economía del país de la entrada en el mercado de los vehículos autónomos, estructurado en fases, hasta la automatización completa del tráfico.



1.5. Organización de la tesis

La tesis doctoral está estructurada en diez capítulos. Este primero contiene la introducción a la misma, exponiendo la motivación, alcance, objetivos y contribuciones de la investigación. El segundo capítulo presenta el estado del arte, analizando la problemática del actual sistema de transporte, la historia de los diferentes vehículos autónomos y el estado de la legislación actual en los tres contextos.

El capítulo 3 explica la revolución tecnológica de los vehículos autónomos y su potencial para cambiar por completo el paradigma del actual sistema de transporte. Se presentan las hipótesis sobre las que se ha sostenido la investigación, se analiza el proceso de transición hacia un nuevo modelo de movilidad y se define el planteamiento teórico de la investigación. El cuarto capítulo contiene un análisis pormenorizado de las características, capacidades y prestaciones de los diferentes vehículos autónomos, aéreos, terrestres y marinos. A su vez se presentan las diferencias entre la automatización de un vehículo y la automatización del tráfico.

El capítulo 5 de la tesis presenta el diseño conceptual del sistema de transporte automatizado desarrollado en la investigación. Está compuesto por tres apartados principales, la gestión automatizada del tráfico, los ingenios autónomos y la red de comunicaciones, que son los pilares básicos de la infraestructura que forma el sistema.

El sexto capítulo estudia las acciones legislativas necesarias para la implementación del sistema de transporte automatizado. Se estudia la estructura administrativa del transporte actual en España y a continuación se presenta el proceso legislativo necesario, así como los principales paradigmas sobre los que se deben apoyar las nuevas regulaciones.

En el capítulo 7 se realiza un estudio de movilidad en una ciudad de referencia. Se utilizan datos de movilidad disponibles, identificando los principales indicadores que determinan cómo se mueve una determinada población, y valorando los principales patrones de movilidad actuales. Seguidamente se realiza una simulación en la que se implementa el sistema de transporte automatizado, presentando los resultados obtenidos.

El octavo capítulo presenta un estudio del impacto económico que tendrá el despliegue progresivo del sistema de transporte automatizado en la economía nacional, estructurado en distintas fases. Se analizan los resultados obtenidos en los principales sectores afectados y a nivel general.

El capítulo 9 valora las principales implicaciones que tiene el sistema de transporte automatizado y los beneficios más destacados que se consiguen con la automatización del tráfico. Por último, el décimo capítulo expone las líneas futuras de trabajo a partir de esta investigación y las conclusiones obtenidas de este trabajo.



2. ESTADO DEL ARTE

El transporte, en su concepto más amplio, es una disciplina que tiene tanta antigüedad como las personas. Hace varios milenios que los seres humanos desarrollaron los primeros vehículos para transportarse, tanto por tierra como por mar. Durante todo este tiempo se han desarrollado y conseguido hitos y avances muy importantes que han dado lugar a nuestro actual sistema de transporte. Sin embargo, el gran crecimiento que ha experimentado el transporte, especialmente en el último siglo, ha derivado en graves problemas que hacen cuestionarse la verdadera utilidad del propio sistema.

Recientemente se han popularizado diferentes vehículos autónomos, por tierra, mar y aire, aunque en realidad son sectores que llevan muchas décadas de desarrollo que han permitido su visibilidad en estos tiempos. En algunos casos, datan siglos atrás los primeros intentos del ser humano por desarrollar vehículos no tripulados. En este capítulo se analiza la problemática actual del sistema de transporte, la historia de los distintos tipos de vehículos autónomos y la legislación de este sector emergente.

2.1. Problemática del transporte actual

Las grandes revoluciones suelen tener un pilar fundamental sobre el que se sustentan, y, además, en la gran mayoría de ocasiones, es la clave de su éxito. En el caso de la revolución que se producirá en el transporte, ese pilar es el enorme potencial que tienen los vehículos autónomos para solucionar los graves problemas de nuestro actual sistema de transporte.

El transporte entendido en su conjunto es un sector muy amplio, y su problemática de igual manera es diversa. Este análisis se centra en los tres problemas más relevantes, como son la contaminación, la siniestralidad y la congestión.

2.1.1. Contaminación

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas de nuestra sociedad actual. Algunos de los elementos contaminantes más relevantes son las partículas sólidas o líquidas disueltas en la atmósfera (PM) formadas por diferentes compuestos, el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el benzopireno (BaP), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO), los metales tóxicos o el benceno. Existen diversas fuentes donde se produce la contaminación atmosférica, como son el transporte, la industria, las centrales eléctricas, la gestión de residuos, la agricultura o los hogares, entre otras. El impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población es muy significativo. Al mismo tiempo también tiene un impacto en los ecosistemas, afectando a la vegetación, la calidad del agua y el suelo.

Un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) calculó que en el año 2012 3,7 millones de personas fallecieron en el mundo debido a la contaminación del aire. De estas muertes, la causa más frecuente fue la enfermedad cardiaca isquémica, representando un 40% del total, seguido de cerca por ictus o accidentes



cerebrovasculares, que aproximadamente representaron otro 40%. El resto se debieron a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, cáncer de pulmón e infecciones respiratorias agudas. Asimismo, se calculó que ese año 7 millones de personas fallecieron en el mundo debido a los efectos conjuntos de la contaminación del aire en los hogares y la contaminación atmosférica [1]. El informe publicado por la Agencia Europea de Medio Ambiente estimó que en 2018 se produjeron en Europa 518.700 muertes prematuras por causa de la contaminación. En España el número de muertes prematuras por este motivo se tasó en 38.600. Además de los nocivos efectos sobre la salud, la contaminación también tiene un considerable impacto económico, acortando vidas, incrementando los costes médicos y reduciendo la productividad por días perdidos [2].

En las áreas urbanas los efectos son más significativos. En el año 2016 entorno al 13% de la población europea que vivía en áreas urbanas estuvo expuesta a PM_{10} por encima del límite de la Unión Europea (UE). El límite establecido por la OMS es más estricto, y en ese caso el 42% de la población europea vivía en zonas donde se excedía. En cuanto al ozono (O_3) entorno al 12% de la población europea estuvo expuesta a concentraciones superiores al límite de la UE, y si atendemos al límite de la OMS, fue el 98% de la población. Siguiendo con el criterio más estricto de la OMS, la población europea expuesta a NO_2 fue del 7%, a BaP fue del 90% y a SO_2 fue del 23% [2].

Las fuentes de emisión de estos elementos contaminantes a la atmósfera son varias, y se pueden agrupar por sectores. Los principales emisores son el transporte, distinguiendo entre transporte terrestre y no terrestre (aéreo, ferroviario y marítimo); el comercial, institucional y hogares; la generación y distribución energética; la industria; la agricultura y los residuos. El transporte terrestre fue responsable en 2016 de ser el mayor emisor de NO_2 , representando el 39% del total de emisiones en Europa, y al mismo tiempo responsable del 10% de emisiones de PM_{10} , del 11% de $PM_{2,5}$, del 2% de NH_3 , del 9% de compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (NMVOC), del 20% de CO y del 28% de carbono negro (BC). En cuanto al transporte no terrestre, fue responsable del 3% de emisiones de SO_2 , del 9% de NO_2 , del 2% de PM_{10} , del 2% de $PM_{2,5}$, del 1% de NMVOC, del 2% de CO y del 4% de BC [2].

Estos datos confirman que nuestro actual sistema de transporte ha llegado a una situación muy preocupante. Los actuales vehículos de combustión son responsables de la emisión de grandes cantidades de elementos contaminantes que se traducen en el fallecimiento de millones de personas en todo el mundo. En la crisis del COVID-19 durante el año 2020, cuando numerosas ciudades de Europa comenzaron a restringir la actividad y la circulación, los datos recogidos en la mayoría de estas ciudades registraron una significativa reducción en las concentraciones de NO_2 , un contaminante emitido por el transporte principalmente [3]. En una situación normal, fuera de las terribles consecuencias de una pandemia, resulta evidente que la solución a las emisiones ocasionadas por el transporte no pasa por cerrar el tráfico para reducirlas o eliminarlas. Es necesario desarrollar vehículos sostenibles, con nuevas tecnologías de propulsión, que reduzcan todo lo posible la emisión de elementos contaminantes. El derecho a respirar un aire limpio debería ser universal para toda la población.



2.1.2. Siniestralidad

Una de las noticias que figura cada día en los telediarios y periódicos de todo el mundo son los accidentes de tráfico. Escuchamos tan a menudo hablar de ellos que los hemos asumido como parte de nuestra normalidad. En realidad, es un problema a gran escala y un verdadero drama social para millones de personas y familias cada año. Las lesiones causadas por el tránsito son la octava causa mundial de muerte, y la primera entre jóvenes de 15 a 29 años. La OMS estimó que 1,24 millones de personas fallecieron en el mundo en el año 2013 a causa de accidentes de tráfico [4]. Un estudio publicado por el NHTSA del Departamento de Transporte de Estados Unidos estimó que alrededor del 93% de los accidentes de tráfico eran causados por el factor humano [5].

Los países más afectados son aquellos con ingresos medios, con una tasa de mortalidad de 20,1 por 100.000 habitantes, mientras que en los países con ingresos elevados es de 8,7 y en los países con ingresos bajos es de 18,3. La región de África es la que tiene la mayor tasa de mortalidad, de 24,1, mientras que Europa tiene la menor, de 10,3. La mitad de las muertes mundiales corresponden a peatones (22%), ciclistas (5%) y motociclistas (23%) [4].

En Estados Unidos hay dos administraciones que ofrecen datos sobre los accidentes de tráfico, empleando criterios diferentes. Por un lado, está el *National Safety Council* (NSC) que contabiliza todas las muertes relacionadas con vehículos de motor, tanto en situación de tráfico como sin tráfico, que ocurren en el periodo de 1 año desde el accidente. Y por otro lado está la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), que únicamente cuenta las muertes que se producen en un periodo de 30 días desde el accidente. En el año 2018, de acuerdo con los datos de la NHTSA se registraron 36.560 fallecidos en accidentes de tráfico, y según la NSC fueron 39.404 fallecidos. Siguiendo el criterio de esta última, los heridos que precisaron atención médica debido a accidentes de tráfico fueron 4,5 millones. La tasa de mortalidad en el país fue de 12,04 por 100.000 habitantes, y supuso un coste de 445,6 billones de \$. Cabe destacar que el 29% de las víctimas están directamente relacionadas con conductores que habían consumido alcohol [6], [7].

En el caso de España, en el año 2018 se produjeron 102.299 accidentes con víctimas, en los que un total de 129.674 personas resultaron heridas no hospitalizadas, 8.935 personas fueron heridas hospitalizadas y 1.806 personas fallecieron [8]. La Dirección General de Tráfico (DGT) publicó en el año 2016 un estudio sobre el coste de los accidentes de tráfico con víctimas, tasando para ese mismo año un coste unitario para heridos no hospitalizados de 6.300 €, un coste unitario de 226.190 € para heridos hospitalizados y un coste unitario de 1.445.962 € para fallecidos. Esto supuso un coste total de 10.268.948.473 € para el país [9].

2.1.3. Congestión

La congestión es uno de los mayores quebraderos de cabeza en la mayoría de las ciudades del mundo. Cuanto mayor es el área metropolitana mayor es la importancia de este problema. La humanidad tiene agudos problemas de movilidad. Nos movemos mucho y lo hacemos con muy poca eficiencia.

El estudio realizado por INRIX Research en el año 2018 estimó que las cinco ciudades más congestionadas del mundo eran Moscú, Estambul, Bogotá, Ciudad de México y Sao Paulo,



por ese orden. Si se atiende al criterio de mayor número de horas de media perdidas en congestión por sus conductores, la primera fue Bogotá, con 272 horas al año, seguida por Roma, con 254 horas. En Estados Unidos las ciudades que lideran el ranking de congestión son Boston (164 h), Washington DC (155 h), Chicago (138 h), Nueva York (133 h) y Los Ángeles (128 h). En España las tres ciudades más congestionadas son Madrid (129 h), Barcelona (147 h) y Valencia (136 h) [10].

Estos rankings están encabezados principalmente por ciudades latinoamericanas y europeas. En el caso Latino América se debe a los vertiginosos ritmos de crecimiento de sus ciudades, el gran número de asentamientos marginales, las complicadas condiciones geográficas y la gran volatilidad financiera, que impiden mejorar la movilidad. En Europa uno de los principales factores es el trazado de sus ciudades, que en muchos casos se remonta a la época de los romanos.

El impacto económico de todas las horas perdidas en atascos es de gran importancia. Se estimó que en el año 2018, a los americanos la congestión les costó, por pérdida de tiempo, 87 billones de \$, lo que representó una media de 1.365 \$ por conductor [10].

Se puede definir como congestión la acumulación excesiva de vehículos que impide la circulación normal por un determinado lugar. Esto ocurre en el momento en el que la demanda de espacio de calzada excede la oferta de espacio existente de calzada. El fenómeno se produce cuando la calzada no puede admitir más vehículos, dando lugar a una reducción en la capacidad de tránsito a consecuencia de que más vehículos tratan de forzar su camino en la misma. El problema de fondo es la gran cantidad de vehículos existentes. Esto contrasta por completo con el número de vehículos que se producen y venden cada año. De acuerdo con los datos que ofrece la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA), en el año 2019 se produjeron 91,7 millones de vehículos en el mundo. El récord histórico de fabricación de vehículos se produjo en el año 2017, con 97,3 millones. En los últimos 10 años se ha incrementado notablemente la cantidad de vehículos fabricados, desde los 61,7 millones del año 2009, hasta los más de 90 millones de la actualidad [11]. Si se sigue con este ritmo de producción, en la próxima década inundaremos las ciudades y carreteras de todo el mundo con unos mil millones de nuevos vehículos. No parece lógico intentar solucionar la congestión multiplicando el número de vehículos. Sencillamente no caben, no hay sitio para tantos.

Problemas como la contaminación, la siniestralidad o la congestión tienen una dimensión muy grande y unas consecuencias devastadoras en ámbitos como la salud o la economía. Es tal la magnitud, que podemos definir nuestro sistema actual de transporte como insostenible, inseguro e ineficiente. Y la pregunta que se plantea es ¿por qué hemos llegado a esta situación? La respuesta radica en el gran éxito que alcanzó el actual sistema de movilidad, basado en un vehículo privado por persona.

En el caso de España, en el año 2018 había una población total de 46.937.060 habitantes. Ese mismo año, el parque móvil del país registró un total de 33.729.982 vehículos. Si consideramos como vehículos de uso particular principalmente turismos y motos, el registro fue de 24.074.151 turismos, además de 3.459.722 motocicletas, sumando un total entre ambos de 27.533.873. El rango de población comprendida entre los 18 y los 65 años representó un total de 29.888.132 habitantes [12], [13]. Si comparamos ambos valores, la



ratio de vehículos particulares por persona en edad activa es de 0,92, confirmando el modelo de un vehículo privado por persona.

El nuevo modelo de movilidad que reemplazará al actual busca erradicar esta problemática, caracterizándose por vehículos sostenibles, que no contaminen el aire que respira la población; inteligentes, eliminando el error humano; y eficientes, evitando las situaciones de congestión de tráfico.

2.2. Historia del transporte y los ingenios autónomos

La revolución del nuevo modelo de movilidad fundamentado en los vehículos autónomos representará una de las mayores innovaciones tanto en la historia del transporte como en las diferentes sociedades. Por este motivo es importante realizar una contextualización histórica del transporte y su evolución a lo largo de los años, así como de los vehículos autónomos, terrestres, aéreos y marinos.

2.2.1. Transporte

El transporte es la acción de traslado o desplazamiento de personas o cosas de un lugar a otro. Se entiende por transporte también el sistema de medios para conducir personas o cosas de un lugar a otro, de acuerdo a las definiciones de la Real Academia Española.

El transporte es intrínseco al propio ser humano, que desde sus orígenes prehistóricos adoptaron una forma de vida nómada, sustentada en la necesidad de desplazarse en busca de alimentos. Eran cazadores y recolectores, y en el momento que se agotaban los recursos de una zona, debían moverse a otro lugar. Con la aparición de los primeros asentamientos humanos en Oriente Medio en el neolítico, los humanos tenían la necesidad de desplazarse de igual modo. El medio de transporte que empleaban era el impulsado por humanos, empleando la fuerza de sus músculos para desplazarse.

Con la aparición de estos primeros asentamientos, nació la práctica de la agricultura y la domesticación de los primeros animales. A pesar de que la primera evidencia clara del uso del caballo como medio de transporte data del año 2.000 a.C., los expertos coinciden, en base a la creciente cantidad de evidencias, en la hipótesis de que los caballos empezaron a ser domesticados en las estepas euroasiáticas entre los años 4.000 y 3.500 a.C. [14]. De esta forma se inició el transporte de tracción animal. En esta misma época se produciría uno de los grandes inventos de la historia de la humanidad, la rueda. La primera rueda de la que se tiene constancia corresponde al año 3.500 a.C. en la antigua Mesopotamia. Los mesopotámicos tiraban de trineos de madera grandes y resistentes equipados con corredores para mover piedras y otros objetos pesados. Hasta que un día una persona reemplazó estos corredores por ruedas. En un primer momento, estos carros se siguieron empleando para mover mercancías y objetos pesados, mientras la gente se desplazaba andando o a espaldas de bueyes. La ausencia de carreteras fue un motivo importante para comprender este hecho. No sería hasta aproximadamente el año 3.000 a.C. cuando la rueda cambió por completo la vida de la gente, cuando los mesopotámicos inventaron el carruaje, un carro de 2 ruedas impulsado por un caballo [15].



Los primeros seres humanos sabían que había cosas que flotaban, como nenúfares o cáscaras de nueces, pero sobre todo troncos. Las olas podían pasar por encima de ellos, pero siempre se mantenían a flote. Diferentes animales se posaban sobre ellos, por lo que posiblemente este fuese el motivo por el que nuestros ancestros se dieran cuenta que era una gran forma de viajar. Se piensa que la primera embarcación utilizada fue un tronco flotante impulsado por una persona sobre él. En la antigua Mesopotamia, cuyo nombre significa “tierra entre dos ríos”, concretamente entre el Tigris y Éufrates, se empleó antes este medio de transporte que la propia rueda. En el año 3.500 a.C. esta civilización utilizaba pequeñas embarcaciones construidas con cañas de distintas plantas para recorrer grandes distancias por el río, tanto para desplazarse como para pescar. También se le atribuye a esta civilización la invención de la vela, en algún momento cercano al año 3.000 a.C. Las primeras velas que se utilizaron tanto en Mesopotamia como en Egipto eran de papiro. Al utilizar la tracción del viento en vez de sus músculos, se pudieron construir embarcaciones de mayor tamaño, lo que supuso un gran avance en la navegación marina [15].

La prevalencia del transporte marino en vehículos, frente al terrestre tiene que ver con una de las partes esenciales de un sistema de transporte, la infraestructura, o más bien, la ausencia de ella en aquel momento. Una vez se habían inventado los primeros vehículos terrestres, surgió la necesidad de crear caminos para que pudiesen circular. Se piensa que los primeros constructores de caminos fueron los propios mesopotámicos, ya que es de suponer que sintieran la necesidad de allanar el terreno efectuando pequeños desmontes y rellenando hondonadas. La carretera más antigua de larga distancia fue la Carretera Real Persa, con una longitud de 2.957 km, que estuvo en explotación aproximadamente del año 3.500 al 300 a.C. En el mismo periodo, coexistieron con las Carreteras Imperiales de China, amplias y cubiertas con piedra, cuya red tenía una longitud de unos 3.200 km. Se puede destacar una ruta comercial por su relevancia, la Ruta de la Seda, que estuvo en funcionamiento durante 1.400 años, alcanzando su esplendor alrededor del año 200 a.C. Fue la ruta más larga del mundo durante más de 2.000 años, empezaba en Cádiz y terminaba en Shanghái, con una longitud de 12.800 km [16].

A diferencia de estos primeros caminos, si se habla de la construcción científica de carreteras, fueron los romanos sus creadores. Se les llama comúnmente calzadas por la utilización de piedra caliza en su construcción. Su técnica era muy elaborada y el modelo sería adoptado hacia el año 300 a.C. El Imperio Romano necesitó construir una amplia red de calzadas para comunicar las provincias entre sí y con la capital, alcanzando los 85.000 km. Este modelo de carretera se convertiría en el estándar durante los siguientes 2.000 años [16]. De manera genérica se puede afirmar que este modelo de transporte terrestre, basado en los carros y carruajes de caballos, con sus respectivas innovaciones con el paso del tiempo, y el modelo de calzada romana, estaría vigente durante dos milenios en la humanidad.

El transporte marítimo, a diferencia del terrestre, no necesitaba de una infraestructura para la navegación de las embarcaciones (a excepción de los puertos o lugares de atraque). Las diferentes civilizaciones fueron mejorando aquellas primeras embarcaciones, tanto de remo como de vela, para ir consiguiendo barcos más sofisticados que permitieron realizar grandes travesías por los mares. Se emplearon tanto con fines bélicos como con fines comerciales durante siglos. Se podrían desatacar diferentes culturas y pueblos, como los vikingos que entre los años 793 y 1.062 surcaron los mares en diferentes incursiones y expediciones. Pero sin lugar a duda, uno de los grandes acontecimientos de la historia de



la humanidad fue el Descubrimiento de América. Acontecimiento ocurrido el 12 de octubre de 1492, cuando la expedición española dirigida por Cristóbal Colón por mandato de los Reyes Católicos, Isabel de Castilla y Fernando de Aragón, llegó a América. Pocos años más tarde, tendría lugar el segundo gran viaje marítimo que haría historia. Se trata de la expedición de Magallanes y Elcano, financiada por la Corona Española. El 20 de septiembre de 1519 partió de Sanlúcar de Barrameda una expedición formada por cinco naves capitaneada por Fernando Magallanes. Tras varios meses de exploración, conseguirían cruzar el estrecho de Magallanes en noviembre de 1520. El año siguiente, murió Magallanes en una batalla en las islas Filipinas, y la expedición eligió a Juan Sebastián Elcano para capitanear el viaje de regreso. Navegarían por el océano Índico y darían la vuelta a África, para finalmente, el 6 de septiembre de 1522, la Victoria, única nave que sobrevivió a la expedición, retornó a Sanlúcar de Barrameda, convirtiéndose así en la primera embarcación de la historia en dar la vuelta al mundo.

Uno de los grandes inventos en la historia de la humanidad, con especial relevancia en el transporte, ha sido la máquina de vapor. Es un motor de combustión externa que consigue transformar la energía térmica de una determinada cantidad de agua en energía mecánica. Las primeras máquinas de vapor podrían remontarse hasta Hero de Alejandría en Egipto alrededor del año 150 a.C., pero la primera viable la fabricaría Thomas Savery en 1698. Años más tarde, Thomas Newcomen diseñó una máquina de vapor superior, instalada en una mina de carbón en 1712. Tenía una gran capacidad de bombeo y podía elevar el agua más de 50 m. Pero el gran avance lo lograría James Watt, que consiguió mejorar enormemente la eficiencia de la máquina de Newcomen añadiendo un condensador separado. Sería patentada en 1769. Fue una de las claves de la Primera Revolución Industrial (1760-1840) originada en Gran Bretaña [17].

Comprobado el éxito de este nuevo invento, la máquina de vapor, hubo muchas tentativas de aplicarla al medio de transporte más avanzado de la época, el barco. No obstante, existe documentación que acredita varios intentos del español Blasco de Garay entre los años 1539 y 1543 de mover naves de entre 100 y 250 toneladas con un sistema mecánico que movía ruedas propulsado por una máquina de vapor. El proyecto no conseguiría el apoyo necesario de la corona [18]. Sería en plena Primera Revolución Industrial cuando se consiguió de manera exitosa el primer barco de vapor. A pesar de otros intentos previos, se le atribuye al estadounidense Robert Fulton la creación del barco de vapor, que lanzaría en 1803 en el río Sena un barco propulsado por una máquina de vapor. Tras una mala acogida continuaría en Estados Unidos sus experimentos [19]. A raíz de este acontecimiento, la industria naval experimentó un gran avance y crecimiento, dando lugar a grandes buques que no pararían de evolucionar hasta los grandes barcos actuales.

La navegación acuática, además de la navegación de superficie, ofrece otra posibilidad, la navegación sumergida. Es una cuestión que desde hace varios siglos levantó el interés y la curiosidad de diferentes inventores. La principal aplicación histórica que se buscó en esta disciplina fueron las actividades bélicas, en batallas como la de Tiro (332 a.C.) donde se emplearon equipos rudimentarios de buceo. Pero posiblemente el ancestro del submarino fueran las barcas cosacas del siglo XVII, empleadas en misiones de reconocimiento e infiltración. Su tripulación caminaba por el fondo del río respirando como en una campana submarina. El primer intento de navegación submarina del que se tiene constancia tuvo lugar en España en el año 1538, en Toledo ante la presencia del emperador Carlos I. Dos griegos entraron y salieron varias veces del fondo del río Tajo sin mojarse y sin que se



apagase el fuego que llevaban en sus manos [20]. A partir de este momento surgieron diversos diseños y prototipos de submarinos en diferentes partes del mundo. Se puede destacar el sumergible construido por el holandés Cornelius Jacobszoon Drebbel en 1620, propulsado por remos [21]. Al estadounidense David Bushnell se le atribuye la creación del primer sumergible militar, empleado en la guerra de la Independencia de EEUU en 1776. Se llamó Turtle, y era capaz de operar subacuáticamente de manera independiente, con capacidad para una persona y propulsado por hélices [22]. El primer submarino propulsado con motor de combustión se construyó en 1864 en Barcelona por Narciso Monturiol. La nave, conocida como Ictíneo II, podía sumergirse 30 m, albergar 2 personas y permanecer bajo el agua durante dos horas [23]. Con la entrada del nuevo siglo, y, sobre todo, durante las dos guerras mundiales, los avances tecnológicos de la tecnología submarina fueron muy considerables. Tras este periodo se llegó al USS Nautilus, el primer submarino propulsado por energía nuclear, botado en 1954, que marcó el cambio hacia los submarinos actuales [24].

El ferrocarril es otro de los principales medios de transporte empleados por los seres humanos. En época de griegos y romanos hay constancia de la existencia de los primeros sistemas de transporte sobre carriles, concretamente una línea en el camino de Diolkos de unos 3 km en el siglo VI a.C., cuyo uso era transportar botes sobre plataformas en el istmo de Corinto. Estas plataformas eran propulsadas por esclavos [25]. Con el paso del tiempo, hay constancia de otras líneas de transporte sobre carriles, incluso de propulsión animal, pero no sería hasta la Primera Revolución Industrial cuando este medio de transporte experimentaría su verdadero crecimiento. Uno de los principales problemas de las primeras máquinas de vapor es que eran demasiado pesadas para ser empleadas en vehículos. La bibliografía de la historia del ferrocarril coincide en atribuir a Richard Trevithick la primera locomotora capaz de arrastrar un tren de manera exitosa en 1804. Coinciden también en destacar a George Stephenson como otro de los padres del ferrocarril moderno, al construir en 1825 la primera locomotora de vapor para mover trenes de transporte público, y cuatro años más tarde construyó la famosa locomotora "The Rocket". La primera línea de ferrocarril del mundo se inauguraría el 15 de abril de 1830 en Inglaterra, entre las ciudades de Manchester y Liverpool. [26]. A partir de ese momento se puede decir que comenzó la era moderna del ferrocarril.

En el transporte terrestre, desde la aparición de los carruajes de caballos, hubo numerosos intentos por desarrollar inventos de máquinas que pudieran ser propulsadas de otras maneras. Uno de estos primeros diseños se le atribuye al jesuita Ferdinand Verbiest en el año 1672, que desarrolló el primer vehículo de vapor en una misión en China, siendo un vehículo a escala para el emperador Kangxi. No obstante, no existe una evidencia certera del correcto funcionamiento del mismo [27]. Data del año 1769 la construcción acreditada del primer vehículo a tamaño real autopropulsado, un triciclo a vapor creado por Nicolas-Joseph Cugnot. Además, construiría dos tractores a vapor para la armada francesa [28]. En el siglo XIX, con la consolidación de la máquina de vapor, y la aparición de los motores de combustión externa e interna, numerosos ingenieros e inventores desarrollaron sus soluciones. Sería a partir de 1880 cuando los trabajos se intensificaron hasta llegar al automóvil que todos conocemos. La creación del coche moderno se le reconoce al alemán Karl Benz. En 1879 patentaría su primer motor, diseñado un año antes. Su primer vehículo, llamado Motorwagen, fue construido en 1885 en Mannheim, y sería patentado un año después [29]. El primer gran viaje de un automóvil fue realizado en agosto de 1888, cuando Bertha Benz y sus dos hijos comenzaron el primer viaje campo a través del mundo, entre



Mannheim y Pforzheim, recorriendo una ruta de más de 100 km. Sin decírselo a su marido, Carl Benz, ella condujo su Benz Patentmotorwagen Number 3 por el sur de Alemania [30]. De los numerosos nombres propios que se pueden destacar en la historia del automóvil, uno de los más relevantes fue Henry Ford. Comenzaría en la década de 1890 a hacer pruebas incorporando motores de gasolina a vehículos de 4 ruedas, pero no sería hasta 1904 cuando se hizo famoso. Uno de sus vehículos batió el récord de velocidad de más de 90 mph (144,84 km/h). Lo más destacado de Ford fue su famoso Model T, creado en 1908, y su trabajo realizado para la fabricación en serie del mismo. El Model T no sería el primer automóvil moderno, pero fue el primer fenómeno masivo de venta de vehículos. Al finalizar la Primera Guerra Mundial, la mitad de vehículos en Estados Unidos eran Model T [31]. La revolución de este invento, el automóvil, fue de tal magnitud que cambió por completo tanto la forma de desplazarse de las personas como el diseño de las ciudades a lo largo del siglo XX.

Los seres humanos hemos querido desde tiempos inmemoriales volar, al igual que lo hacen los pájaros. Es uno de los sueños más antiguos y anhelados de la humanidad. En una primera etapa, considerara la época de los precursores, que abarca desde la antigua Grecia hasta el comienzo del siglo XVII, diferentes personas imaginaron de manera más o menos realista cómo podrían ser las máquinas voladoras. La siguiente época se caracteriza por el diseño de aeronaves más ligeras que el aire, como es el caso del globo aerostático o el dirigible. Los libros atribuyen al portugués Bartolomeu Lourenço de Gusmao el primer vuelo de un globo de aire caliente en 1709, consiguiendo volar unos tres metros por encima del suelo. No sería, sin embargo, hasta 1783 cuando se realizaría el primer vuelo humano en un globo inventado por los hermanos Montgolfier [32]. En 1852 el ingeniero francés Henri Giffard inventaría el dirigible, que a diferencia del globo si podía controlar la dirección mediante el uso de timones y motores [33]. La siguiente etapa estuvo caracterizada por la invención de máquinas más pesadas que el aire que pudieran volar, los planeadores. En el año 1799 el inventor inglés George Cayley diseñó un planeador que tenía una cola que permitía su control, además de un habitáculo para un piloto. En 1804 realizó los primeros vuelos de prueba no tripulados. Tardaría cinco décadas hasta que su prototipo realizó el primer vuelo tripulado en 1853. Durante ese tiempo, Cayley dedujo muchas leyes básicas de la aerodinámica, y para muchos es el fundador de esta ciencia, siendo la primera persona que describió una aeronave de ala fija propulsada por motores [32].

El primer vuelo controlado, propulsado y sostenido más pesado que el aire tendría lugar en diciembre de 1903, en las dunas de Kitty Hawk en Estados Unidos, cuando los hermanos Wilbur y Orville Wright experimentaron con su primer avión. Los dos hermanos hicieron cuatro vuelos, siendo el último el más largo: consiguió volar 284 m en un tiempo de 59 segundos [34]. No obstante, existe cierta controversia en la bibliografía respecto a la autoría de este primer vuelo, ya que algunos autores se lo atribuyen al brasileño Alberto Santos Dumont, quien realizó en París el primer logro del avión 14-bis sin ningún tipo de artificios externos [35]. Estos primeros vuelos supondrían un antes y un después en la historia de la aviación. Desde ese momento, numerosos inventores y científicos de todo el mundo se sumaron al desarrollo de diferentes aeronaves. La Primera Guerra Mundial fue un gran incentivo en el desarrollo de estas tecnologías, al igual que el periodo entre ambas guerras mundiales, considerado como la era de oro de la aviación. Se podrían destacar numerosos hitos relevantes, como las primeras travesías de los océanos. La posterior aparición de los turbohélices y los motores a reacción sería decisiva en la evolución hacia la aviación moderna. Uno de los grandes hitos se consiguió en 1947, cuando Charles Yeager se



convirtió en la primera persona en sobrepasar la velocidad del sonido a bordo de una aeronave Bell X-1 [36].

En la segunda mitad de siglo XX, durante la Guerra Fría entre Estados Unidos y la Unión Soviética, se produjo otro de los acontecimientos más relevantes en la historia del transporte, el inicio de la carrera espacial. Los avances tecnológicos conseguidos hasta aquel momento en diferentes sectores, como la aeronáutica, la astronáutica y los cohetes posibilitaron al ser humano comenzar la conquista del espacio. El 4 de octubre de 1957 la URSS lanzaría de manera exitosa el primer satélite artificial, el Sputnik 1, logrando colocarlo en órbita. Unos años más tarde, el 12 de abril de 1961, el soviético Yuri Gagarin se convertiría en el primer ser humano en llegar al espacio, realizando un vuelo orbital en la nave Vostok1. El 4 de enero de 1959, los soviéticos consiguieron volver a adelantarse a los americanos y consiguieron que la sonda Luna 1 llegase a la Luna. En cambio, sería Estados Unidos quien logró que el ser humano pisase la Luna por primera vez, cuando el 20 de julio de 1969 Neil Armstrong, comandante de la misión Apolo 11, se convirtió en el primer hombre que caminó en la Luna [37]. Y como el propio Neil afirmó, aquel día se dio *“un pequeño paso para el hombre, un gran salto para la humanidad”*.

En este breve análisis de la evolución histórica del transporte se han reseñado algunos de los inventos y avances más significativos que han marcado un antes y un después en la forma que tenemos las personas de movernos. Los seres humanos tenemos la necesidad de desplazarnos, y desde el origen de los tiempos hemos puesto nuestro ingenio y creatividad al servicio de la búsqueda de nuevas y más eficientes formas de moverse. Lo cierto es, que hemos conseguido desarrollar los vehículos y las infraestructuras necesarias para viajar por tierra, mar y aire, de formas muy diversas. Incluso estamos en las primeras fases de los viajes espaciales, que en un futuro permitirán a la especie humana llegar a nuevos planetas. En los más de cinco milenios que han transcurrido desde la invención de la rueda o la vela, se han obtenido infinidad de inventos y tecnologías muy importantes para el transporte. No obstante, el mayor salto cualitativo, en los tres medios, se ha producido en el último siglo. El estado actual de desarrollo de estas tecnologías es tal, que se ha conseguido crear vehículos capaces de navegar por sí mismos, sin intervención humana, tanto terrestres como, aéreos y marinos. Los libros de historia del futuro recogerán este hito, la navegación autónoma, como la siguiente gran revolución, no solo de la historia del transporte, sino de la historia de la humanidad. A continuación, se analiza el estado y la historia de estos vehículos en cada uno de los medios.

2.2.2. Conducción Autónoma

En los últimos años se ha popularizado la conducción autónoma como una de las grandes innovaciones del momento. La realidad es que la conducción autónoma ha sido un reto para la comunidad científica desde hace décadas. El objetivo es conseguir un sistema autónomo que permita al vehículo completar la ruta entre su origen y su destino de manera segura y sin ningún tipo de intervención humana.

Uno de los primeros proyectos de investigación se llevó a cabo en Europa hace más de 30 años, en 1986. El proyecto VaMoRs era una furgoneta de 5 toneladas equipada con los actuadores, interfaces, equipos de generación de energía y demás componentes necesarios para ser conducida autónomamente bajo el control de un ordenador. Era un laboratorio rodante para la investigación en visión artificial. Permitted demostrar diferentes



capacidades como aceleraciones en línea recta hasta velocidades de 35 km/h, seguimiento de líneas alcanzando los 100 km/h y recorriendo 20 km sin intervención humana, seguimiento de la carretera sin ningún tipo de marcas viales, cambio de carriles, recorrido en un camino rural y la detención delante de obstáculos desde una velocidad de hasta 40 km/h [38].

En la década de los 90 se continuó el trabajo de investigación en el marco del proyecto Prometheus. Se consiguieron importantes avances en el reconocimiento de objetos, tanto en visión delantera como trasera, a distancias de hasta 100 metros, pudiendo detectar de 4 a 5 objetos en paralelo. El gran aporte se obtuvo en los sistemas de procesamiento paralelo, que permitieron representaciones 4D de objetos [39]. Al mismo tiempo, el proyecto Oscar, un vehículo experimental, recorrió más de 3.000 km de manera autónoma en carreteras alemanas, entre los años 1992 y 1994. Uno de los aportes más significativos de este proyecto estaba en la asistencia y control de la dirección del vehículo, incluso a altas velocidades de hasta 160 km/h [40]. Se desarrollaron contribuciones similares durante esa década en Estados Unidos. Entre las más relevantes se encontraba Ralph, el sistema de visión desarrollado por la Universidad de Carnegie Mellon y AssistWare Technology Inc. El sistema fue capaz de realizar un viaje conduciendo un vehículo durante 2.850 millas desde Washington D.C. hasta San Diego, donde el sistema de visión fue capaz de conducir el vehículo de manera autónoma durante el 98,1% del recorrido [41].

En el siglo XXI, los primeros grandes proyectos destacados fueron organizados por el DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). El primer Grand Challenge fue lanzado en 2003 para impulsar la innovación en la navegación de vehículos terrestres no tripulados. El objetivo de este reto era el desarrollo de un robot autónomo que fuese capaz de atravesar un terreno no asfaltado por el desierto de Mojave. La primera competición tuvo lugar el 13 de marzo de 2004, con un premio para el ganador de 1 millón de €. Los robots tenían que hacer un recorrido de 142 millas a través del desierto en menos de 10 horas. Se inscribieron 106 equipos, de los cuales corrieron 17, y ninguno de los participantes navegó más del 5% del recorrido. El reto se repitió el 8 de octubre de 2005, incrementando el premio a 2 millones de €. Se inscribieron 197 equipos, de los cuales compitieron 23, de los cuales 5 terminaron la competición, 4 de ellos por debajo de las 10 horas [42]. El ganador fue el robot Stanley, de la Universidad de Stanford, con un tiempo de 6 horas, 53 minutos y 58 segundos. El gran desafío que consiguió Stanley fue el desarrollo de un sistema altamente fiable capaz de conducir a velocidades relativamente altas a través de entornos todoterreno y no estructurados con una gran precisión. A pesar del gran hito que supuso en la conducción autónoma, seguían pendientes grandes retos, como la circulación con tráfico [43].

En el año 2005 comenzó otro de los proyectos pioneros en Europa, el programa español AUTOPIA, cuyo principal objetivo era el desarrollo de un sistema automático que pudiese realizar un conjunto de maniobras de un coche de la misma manera que lo hace un conductor humano. En el desarrollo de las dos arquitecturas propuestas, se planteó la capacidad de la conducción cooperativa entre diversos vehículos [44].

El siguiente gran paso dado fue el DARPA Urban Challenge convocado para el 3 de noviembre de 2007, donde los vehículos tenían que conducir 97 km en un entorno urbano, interactuando con otros vehículos, además de con peatones, ciclistas o semáforos. El ganador de este reto fue Boss, un vehículo autónomo desarrollado por el equipo Tartan Racing Team, formado por integrantes de la Universidad Carnegie Mellon, General Motors,



Caterpillar, Continental e Intel. El vehículo era capaz de conducir de manera segura con tráfico a velocidades de hasta 48 km/h. Estaba equipado con sensores de abordaje, como GPS, láseres, radares y cámaras, para identificar y seguir otros vehículos, detectar obstáculos estáticos y posicionarse a sí mismo respecto al entorno [45]. Este conjunto de retos permitió a un gran número de grupos de investigación, científicos y empresas adquirir un gran conocimiento y experiencia en la conducción autónoma. Se consiguieron resolver retos importantes y plantear el camino a seguir para conseguir resolver problemas complejos que aún no tenían solución.

En la última década, la investigación y desarrollo realizados por la comunidad científica en la conducción autónoma ha sufrido un crecimiento exponencial. En el año 2009 comenzó el proyecto Self-Driving Car de Google, que pronto se convertiría en el más emblemático y daría la vuelta al mundo, popularizando un sector emergente, pero con décadas de trabajo. En 2012, habían recorrido más de 300.000 millas en carreteras públicas con sus vehículos en modo autónomo. En el año 2016, el proyecto se transformó en Waymo, una spin-off de Alphabet. En junio de 2018, su flota de vehículos autónomos había conducido de manera autónoma más de 7 millones de millas, la mayoría en calles [46]. En estos últimos años, numerosas empresas han popularizado de igual manera sus proyectos de conducción autónoma, como pueden ser Tesla, Uber o Lyft entre otros.

El objetivo compartido de todos los que forman parte de este sector es alcanzar un vehículo completamente autónomo que sea capaz de trasladarse por sus propios medios, desde un origen hasta un destino de manera segura. Las áreas de conocimiento que abarca un reto de esta complejidad son numerosas, y el nivel de avances científicos y la hiperespecialización conseguidos estos últimos años son muy elevados.

2.2.3. Navegación Aérea Autónoma

La explosión de los drones recientemente hizo que se popularizara entre la sociedad un sector que poco tiene de nuevo. Los vehículos aéreos no tripulados, en comparación con los terrestres o marinos, son, sin lugar a duda, los que tienen un mayor desarrollo histórico y se han utilizado durante un siglo para diferentes aplicaciones.

El término más conocido para referirse a este tipo de vehículos aéreos es dron, una palabra de origen inglés tradicionalmente referida al macho de la abeja. Fue en el año 1935 cuando el comandante estadounidense Delmer Fahrney empleó el nombre dron para referirse a aeronaves de control remoto utilizadas por la marina en prácticas de tiro, en homenaje a la aeronave Queen Bee de la Royal Navy británica [47]. No obstante, el término que tradicionalmente se ha utilizado dentro del sector para estas aeronaves es UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), haciendo referencia a cualquier vehículo aéreo no tripulado. El término más completo es UAS (*Unmanned Aircraft System*), que además del vehículo aéreo, incluye su carga de pago, la estación de control, las comunicaciones, los subsistemas de lanzamiento y recogida, si los hubiera, subsistemas de apoyo, transporte, etc. Otro término que se ha empleado recientemente es RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), para hacer referencia a aeronaves necesariamente pilotadas de manera remota. En el caso de las aeronaves completamente autónomas, se ha adoptado el concepto de AAV (*Autonomous Aerial Vehicle*).



En función de la interpretación que se haga de la definición, se podría llegar a decir que el primer UAV fue una piedra lanzada por un hombre de las cavernas en la prehistoria, o quizás un cohete chino lanzado en el siglo XIII. La peculiaridad de estos “vehículos” es que tenían poco o ningún control y básicamente seguían una trayectoria balística. Algunos autores atribuyen el primer proyecto de vehículo aéreo no tripulado a Archytas de Tarantas, en el año 425 A.C., al implementar un conjunto de conceptos y mecanismos geométricos colocados en el estómago de un pájaro que le permitía volar. En esta misma línea de pensamiento, los siguientes inventos destacados se le atribuyen a Leonardo Da Vinci, que en 1483 diseñó una aeronave capaz de volar verticalmente, considerada por algunos expertos como el ancestro del actual helicóptero [48]. Años más tarde, en 1508, Da Vinci ideó un pájaro mecánico que podría batir sus alas por medio de un mecanismo de doble manivela mientras descendía por un cable [49]. En el año 1754, Mikhail Lomonosov diseñó un impulsor axial, y en 1783 Bienvenue Launoy diseñó un propulsor contra-rotatorio [48]. Al igual que los aquí citados, se podrían considerar otra serie de invenciones como predecesoras de las aeronaves no tripuladas. En otra corriente de pensamiento, limitando la definición a vehículos que generen sustentación aerodinámica y tengan un mínimo control, probablemente la cometa sería el primer UAV. En 1883 un inglés llamado Douglas Archibald colocó un anemómetro en una cometa para medir la velocidad del viento en altitudes de hasta 1.200 pies. Cuatro años más tarde colocaría cámaras en las cometas, originando así uno de los primeros vehículos aéreos no tripulados de reconocimiento [50].

Las aplicaciones militares fueron una de las grandes motivaciones en el desarrollo de este tipo de tecnología. Se puede datar en el año 1849 el primer uso de vehículos aéreos no tripulados en combate, cuando los austriacos atacaron la ciudad italiana de Venecia con 200 globos no tripulados cargados con bombas provistas de temporizadores. En 1900 Nikola Tesla presentó su concepto de globo con control inalámbrico, y quince años después describiría una flota de vehículos aéreos en combate [48]. El punto de unión de criterios entre las diferentes corrientes que se encuentran en la bibliografía del sector, es la Primera Guerra Mundial. Elmer Sperry, el inventor del giroscopio, fue uno de los grandes precursores de la aviación no tripulada. En 1916 desarrolló con éxito un sistema de control automático para el Curtiss Flying Boat, de Glenn Curtis, el inventor del hidroavión [51]. En 1917 Curtiss entregó una aeronave capaz de transportar 1.000 libras de artillería a una distancia de 50 millas a una velocidad de 90 mph. Unos días después se demostró exitosamente el funcionamiento del torpedo aéreo. La marina de Estados Unidos encargó cinco aeronaves para ser utilizadas como bombas aéreas. Las pruebas realizadas por los hidroaviones Curtiss N-9 no fueron exitosas al sufrir varios accidentes después del lanzamiento y fallos de motor, y el programa sería cancelado en 1918 [51], [52]. Al mismo tiempo, Charles Kettering desarrolló un biplano conocido como el Kettering Aerial Torpedo o “Kettering Bug”, que podía volar casi 40 millas a una velocidad de 55 mph y cargar 180 libras de explosivos. El vehículo era guiado mediante controles preestablecidos y tenía alas desmontables que se soltaban cuando pasaba por encima del objetivo, lo que permitía al fuselaje caer como una bomba [50]. En esa época, tanto los británicos por medio de Farnborough que construyó 6 aeronaves sin piloto, cuyos vuelos de prueba serían fallidos, como los alemanes con planeadores no tripulados, estaban iniciando sus investigaciones y pruebas experimentales en el sector [51].

En el periodo entre ambas guerras mundiales, el desarrollo de las aeronaves no tripuladas se vio beneficiado por los importantes avances conseguidos en la industria de la aviación tripulada. En 1924, Archibald Montgomery Low, conocido como el padre de los sistemas



de guiado por radio, realizó el primer vuelo exitoso controlado por radio. En 1933 los británicos volaron tres biplanos controlados remotamente desde un barco. Se considera que Gran Bretaña fue el primer país en apreciar el verdadero valor de los UAVs al decidir utilizar uno como objetivo y no ser capaces de derribarlo. En 1939 se formó la Radioplane Company, que construiría cientos de drones durante la Segunda Guerra Mundial [50]. Fue en esta guerra en la que se comenzó a usar en serio estos vehículos. Los alemanes desarrollaron un vehículo aéreo no tripulado conocido como el V-1 "Buzzbomb". Fue anunciado como el primer misil de crucero exitoso, realizaron misiones unidireccionales a velocidades de 400 mph a menos de 1000 pies del suelo. Podían viajar de Francia a Londres en apenas 22 minutos, y sus efectos fueron devastadores. Llegaron a Reino Unido 8.892 bombas, causando más de 6.200 fallecidos y más de 18.000 heridos graves [51]. En este periodo destacó la Operación Afrodita, el programa secreto de la Fuerza Aérea de EEUU con el doble objetivo de destruir las instalaciones de lanzamiento y producción de los vehículos de la serie V (V-1, V-2, V-3) de los alemanes, y como una forma de deshacerse de los bombarderos B-17. Los primeros 6 vuelos de esta operación se realizaron en agosto de 1944, contra tres bases alemanas en el norte de Francia, siendo el resultado moderadamente exitoso [52].

En la Segunda Guerra Mundial se comprobó la verdadera utilidad de los UAVs, por lo que la investigación y desarrollo en el sector fue cada vez mayor. En abril de 1946, se realizó el primer vuelo no tripulado de investigación puramente científica, el Northrop P-61 Black Widow, cuya tarea fue recopilar datos meteorológicos para la Oficina Meteorológica de EEUU [48]. A principios de la década de 1950, Ryan Aeronautical Company desarrolló 32 UAVs subsónicos de propulsión de chorro, conocidos como Ryan "Firebees". Su diseño sobrevive a día de hoy y ha dominado en la historia de los UAVs [52]. En 1959 oficialmente nace el plan de vuelos de UAVs, debido a la preocupación de la Fuerza Aérea estadounidense por la pérdida de pilotos en territorio enemigo. Un año más tarde, se produce el lanzamiento del programa "Red Wagon", cuando Francis Gary Powers que pilotaba un U-2 fue derribado sobre la URSS. En agosto de ese año tuvo lugar el primer vuelo de un helicóptero no tripulado Gyrodine QH-50A [48].

Uno de los principales usos de estas aeronaves ha sido su uso en los conflictos bélicos. Se puede destacar su uso en la Guerra Fría, la Guerra de Corea, la Guerra de Vietnam, el Conflicto del Líbano, la Guerra de Bosnia o las Guerras de Afganistán e Iraq. En la actualidad, no hay operación militar que no se apoye en estos vehículos aéreos.

Entre la gran cantidad de aeronaves no tripuladas y sus diversas aplicaciones que se han desarrollado en los últimos 60 años, destacaremos algunas de las más relevantes. Una de las aeronaves más destacadas fue el UAV Pioneer israelí, que voló en más de 300 misiones de reconocimiento de combate con el ejército de EEUU durante las operaciones en el golfo pérsico. El sistema RQ-2A Pioneer recibió un gran reconocimiento por su desempeño sobresaliente y efectividad como plataforma de reconocimiento, vigilancia, adquisición de objetivos, apoyo al fuego naval y plataforma de gestión del campo de batalla. Otra de las aeronaves más emblemáticas es el RQ-4 Global Hawk, de Northrop Grumman, diseñada a finales del siglo para otorgar a la Fuerza Aérea de EEUU una abrumadora ventaja en la recopilación de inteligencia. Tiene una envergadura de más de 35 metros, con una estructura principalmente de materiales compuestos. Originalmente fue diseñada para poder volar de manera autónoma desde una base en EEUU a cualquier país de interés, con una autonomía de 24 horas a una velocidad de 400 mph y una altitud de más de 19 km



(65.000 pies), mientras transmite datos de vigilancia, para después regresar a la base sin repostaje. No es una aeronave para entrar en áreas de alta amenaza, pero su carga de pago le permite proporcionar inteligencia desde alturas muy elevadas. Y, posiblemente, la aeronave no tripulada más conocida, el RQ-1 Predator, fabricada por General Atomics, cuyo primer vuelo se realizó en 1994. Fue un UAV diseñado para dar un servicio conjunto para el Pentágono. Tiene una autonomía de 40 horas y una altitud de crucero de más de 7,5 km (25.000 pies). Su principal carga de pago es una torreta de sensor electroóptico, que incorpora una combinación de sensores de luz diurna, infrarrojos y láser. Su carga de pago también puede incluir un radar de apertura sintética (SAR), que proporciona la capacidad de inspeccionar hasta 1.300 millas náuticas cuadradas. Además, también pueden portar misiles Hellfire, habiendo realizado varias misiones en Afganistán [51].

En la industria militar los UAV son una realidad desde hace décadas. En cambio, en el sector civil, ha sido una tecnología desconocida hasta la última década. Los avances científicos conseguidos en tecnologías como los microprocesadores o las baterías eléctricas, permitieron el boom de los multicópteros, aeronaves de ala fija de pequeñas dimensiones e incluso aeronaves de despegue vertical. Estos avances hicieron posible una reducción brutal en el coste de estas aeronaves, superando uno de los grandes problemas que las había alejado de utilización en aplicaciones civiles. Otro de los problemas que ha dificultado su entrada en el mercado, ha sido la integración de las mismas en el espacio aéreo [53]. Las aplicaciones que tienen estos vehículos aéreos son muy numerosas, desde la agricultura, la inspección de tendidos, el control de incendios, reportajes aéreos, obtención de información meteorológica y un amplio etcétera. Una de las más relevantes, y de especial interés en esta tesis, es el transporte, tanto de mercancías como de personas. La entrega de mercancías en la última milla con drones se hizo muy popular a raíz del anuncio de Amazon en el año 2013. Desde entonces numerosas investigaciones y estudios se han realizado en esta línea [54]. Otra de las líneas más prometedoras es el desarrollo de aeronaves autónomas para el transporte de personas, en la que llevan años trabajando compañías como Airbus, Boeing, Bell Helicopters o Lockheed Martin. Uno de los programas más ambiciosos es Uber Elevate, orientado a un transporte aéreo bajo demanda en grandes núcleos urbanos [55].

2.2.4. Navegación Marina Autónoma

La navegación autónoma marina posiblemente sea la mayor desconocida para una gran parte de la sociedad, a pesar de ser un sector en desarrollo desde hace décadas. Las particularidades y condiciones específicas del entorno marítimo o acuático en general, hacen necesaria una primera clasificación de este tipo de vehículos. Por un lado, están los vehículos de superficie, comúnmente conocidos como USV (*Unmanned Surface Vehicle*), que son aquellas embarcaciones no tripuladas que pueden ser controladas de manera remota, o ASV (*Autonomous Surface Vehicle*), término que corresponde a aquellas embarcaciones autónomas. En la bibliografía también se puede encontrar el término ASC (*Autonomous Surface Craft*) para referirse a este tipo de vehículo. Y, por otro lado, están los vehículos submarinos, conocidos generalmente como UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*), para referirse a submarinos no tripulados, que pueden ser controlados remotamente, o AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), en el caso de submarinos autónomos.



Este tipo de embarcaciones ha ganado bastante popularidad especialmente en las últimas dos décadas, pero la realidad es que el desarrollo de esta tecnología data de la Segunda Guerra Mundial. Los primeros diseños tenían el propósito de ser vehículos tipo torpedo para limpiar minas u obstáculos en las zonas de surf. En el año 1946 se utilizaron USVs para recoger muestras de agua después de la realización de pruebas atómicas en Bikini Atoll [56]. Uno de los primeros trabajos de investigación destacados en ASCs fue el vehículo DOLPHIN (*Deep Ocean Logging Platform with Hydrographic Instrumentation and Navigation*), desarrollado por Submarine Engineering, Ltd. en el año 1983, en Canadá [57]. En el año 1990 destacó el proyecto británico MIMIR, destinado a la búsqueda y vigilancia [58]. En Estados Unidos también se realizaron diversas investigaciones, siendo una de las primeras destacadas el proyecto ARTEMIS en el año 1993, desarrollado en el MIT, con el objetivo de recolectar datos batimétricos en las regiones litorales de manera económica. Los potenciales usos de estos datos permiten estudios de monitoreo de la costa, operaciones de contramedidas de minas y oceanografía física y biológica [59].

Con el cambio de siglo, la cantidad de trabajos e investigaciones realizadas en el sector creció notablemente. Un proyecto destacado fue el italiano SESAMO, un catamarán autónomo diseñado para recoger muestras de la micro capa de la superficie del mar y estudiar las interacciones ente el mar y el aire. Realizó su expedición al Antártico en 2004 [60]. En Portugal se desarrolló el proyecto DELFIM, en el año 2004, una embarcación autónoma de superficie (ASC) cuya misión era la adquisición automática de datos marinos, además servía de relé acústico entre embarcaciones sumergidas y una embarcación de apoyo de superficie [61]. Otras iniciativas europeas se desarrollaron en Noruega en el año 2008, en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, con las embarcaciones Kaasboll y Viknes, que formaron parte de una investigación sobre el guiado autónomo en base a una embarcación líder tripulada [62].

En la bibliografía científica actual cada vez se encuentra mayor información sobre este tipo de tecnologías. Para profundizar en el estado del arte del sector, cabe destacar el estudio realizado por la Universidad de Concordia de Canadá, que realiza un amplio análisis de los trabajos más destacados en la navegación autónoma marina entre los años 1985 y 2015 [63].

Los avances conseguidos y retos superados durante este tiempo son muy amplios y significativos. No obstante, aún quedan una serie de retos y desarrollos pendientes para que las embarcaciones autónomas puedan operar en un entorno desestructurado e impredecible sin la supervisión humana. La consecución de esta autonomía completa pasa por resolver cuestiones claves, como las siguientes. El guiado autónomo, que implica la planificación de trayectorias, a nivel global, local o de manera híbrida, tanto en situaciones ideales, como en condiciones inesperadas o adversas. La replanificación de trayectorias es importante también, teniendo en cuenta los sistemas avanzados anti colisión y los protocolos a seguir. En segundo lugar, está la navegación. Para ello es importante seguir avanzando en las tecnologías de detección, como son radar, sonar, sistemas de visión y la detección multi-modal; y en paralelo avanzar en los sistemas de localización e inerciales del propio vehículo. En la navegación marina es fundamental la percepción del entorno, incluyendo el reconocimiento de obstáculos y los cambios en los efectos del entorno, de tal manera que la embarcación adquiera suficiente información sobre cuál es su situación. Y, en tercer lugar, están los sistemas de control. Se ha de avanzar tanto en la modelización



de los mismos, siendo importantes la modelización no lineal y el control de altas velocidades, y a su vez los sistemas de control de la embarcación [63].

En el caso de los vehículos submarinos, UUV o AUV, a diferencia de los vehículos autónomos terrestres o aéreos, se les presenta un reto único en la navegación, que es el posicionamiento, no solo por la gran falta de precisión de los sistemas satelitales debajo del agua, sino por las particularidades del entorno submarino [64]. Este tipo de embarcaciones submarinas emplean una serie de técnicas y métodos particulares para posicionarse, que se agrupan en tres categorías. Los sistemas inerciales de navegación, basados en el uso de giróscopos que detectan las aceleraciones del vehículo, y se suelen combinar con un DVL (*Doppler velocity log*) que permite medir la velocidad relativa del vehículo. La segunda categoría es la navegación acústica, que utiliza balizas de transpondedor acústico para que el AUV determine su posición. Los métodos más comunes son los LBL (*long baseline*) que usa al menos dos transpondedores ampliamente separados y USBL (*ultra short baseline*) que usa transpondedores calibrados por GPS en una sola embarcación de superficie. Y en tercer lugar, está la navegación geofísica, que se fundamenta en la utilización de las características físicas del entorno del AUV para generar una estimación de la localización del vehículo [65].

Una vez conseguidos los retos que implican la navegación autónoma de una embarcación, el siguiente paso es la navegación de sistemas cooperativos. Un punto estratégico es el control centralizado o el control distribuido. Pero también es importante resolver la cooperación entre sistemas autónomos y sistemas tripulados.

Al igual que en el sector aéreo, la industria militar ha sido el principal promotor del desarrollo de este tipo de embarcaciones, por el gran abanico de posibilidades que abren en sus operaciones, y, sobre todo, por la seguridad para la tripulación de las mismas en situaciones de conflicto [66]. Pero en la última década, la industria civil se ha sumado a este desarrollo, y ya se coincide en la gran revolución que supondrán los buques autónomos, tanto en el transporte de personas como de mercancías. Los grandes referentes del sector, como es el caso de Rolls-Royce, tienen en marcha ambiciosos proyectos que pretenden liderar este cambio en la navegación marina [67].

En la actualidad los vehículos autónomos, tanto terrestres, aéreos y marinos, se encuentran en un estado muy avanzado de desarrollo tecnológico. En esta tesis doctoral se aborda la navegación autónoma multicontexto, es decir, abarcando tierra, aire y mar. Debido a la disparidad de nomenclatura empleada en cada uno de los sectores para referirse a este tipo de vehículos, de ahora en adelante se empleará el término ingenio autónomo. Se entiende por ingenio autónomo a cualquier vehículo con capacidad de navegación autónoma, capaz de desplazarse por sí mismo desde un origen a un destino, sin intervención humana, dotado con capacidad de comunicación, tanto con otros ingenios como con la infraestructura, y que además emplea una tecnología de propulsión sostenible.

2.2.5. Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS)

De acuerdo a la temática de esta tesis doctoral es conveniente realizar un breve análisis de los sistemas de transporte inteligente, comúnmente conocidos como ITS (*Intelligent*



Transportation Systems). El objetivo es contextualizar estos sistemas, analizar sus propósitos y comprender las diferencias con el modelo presentado en este trabajo.

Los sistemas de transporte inteligentes según la definición de la Directiva 2010/40/UE de la Unión Europea, son aplicaciones avanzadas que, sin incluir la inteligencia como tal, proporcionan servicios innovadores en relación con los diferentes modos de transporte y la gestión del tráfico y permiten a los distintos usuarios estar mejor informados y hacer un uso más seguro, más coordinado y “más inteligente” de las redes de transporte [68]. Son sistemas diseñados para su aplicación en el transporte terrestre, incluyendo tanto carreteras urbanas y rurales, como ferrocarriles. A pesar de que su concepción no excluye otros modos de transporte, en el sector aéreo y marítimo se han desarrollado otras soluciones, que serán analizadas más adelante en esta tesis.

Los pioneros en estos sistemas inteligentes de transporte fueron Estados Unidos, Europa y Japón. Originalmente se comenzaron a desarrollar en Estados Unidos en la década de 1960. A principios del siglo XX comenzó la cultura del coche, cuyas ventas crecieron muy rápido. La seguridad había sido un problema de la industria automotriz reconocido desde la década de 1930, pero no sería hasta 1967 cuando se volvió obligatorio en los nuevos automóviles el uso de cinturones de seguridad, los tableros acolchados, las alturas estándar de los parachoques y los sistemas de frenos dobles. Posteriormente se implementarían los estándares de los air bags y los asientos para niños [69].

Los principios y conceptos para el uso de tecnologías avanzadas en el sistema de transporte surgieron en esa época, pero fueron anteriores a ningún programa nacional de ITS. Estas raíces iniciales surgieron en diversas iniciativas y proyectos de investigación realizados por diferentes instituciones y organizaciones. Los motivos y razones fundamentales que promovieron el desarrollo de estos sistemas fueron la seguridad, la reducción de la congestión y la mejora de la movilidad. La primera iniciativa fue un sistema de guiado electrónico en ruta (ERGS), resultado de una investigación llevada a cabo en 1967 por la Oficina de Vías Públicas del Departamento de Transporte de EEUU [69]–[71]. En Europa los desarrollos en sistemas ITS comenzaron en la década de 1970, logrando significativos avances en los sistemas RTI (*Road Transport Informatics*). La primera iniciativa de la Comisión Europea fue el programa DRIVE (*Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe*). El programa se originó en 1985 y estaba formado por 70 proyectos individuales conectados en diferentes aspectos [71], [72]. En Japón sería también la década de los 70 cuando se comenzaron a invertir recursos en sistemas ITS con el objetivo de construir sistemas de transporte seguros y sostenibles. La primera aplicación destacada fue VICS (*Vehicle Information and Communication System*) cuyos trabajos se iniciaron en 1991. La aplicación podía proporcionar información del tráfico y de los aparcamientos disponibles a los conductores las 24 horas del día [71], [73].

En estas primeras etapas de los sistemas ITS, las principales áreas de desarrollo fueron:

- Tecnologías de navegación y mapeado.
- Detectores de bucle (*Loop Detectors*).
- Señales de mensajes dinámicos.
- Técnicas de gestión de rampas.
- Centros de gestión del tráfico.
- Sistemas de posicionamiento global (GPS).



A partir de la década de 1980 se siguió trabajando en diferentes proyectos, dependiendo del país. Por lo general fueron iniciativas de investigación vinculadas a diferentes administraciones, en busca de un transporte más seguro y eficiente.

Desde un punto de vista genérico, la arquitectura de los sistemas ITS se puede agrupar en tres partes [71]:

- a) La percepción y convergencia de la información del tráfico. En la percepción, los datos básicos de los sistemas ITS involucran a los diferentes elementos, es decir, vehículos, personas y carreteras. La información del vehículo consta de parámetros, tanto relativos a las condiciones de funcionamiento (movimiento, ubicación, velocidad, dirección, aceleración, freno, etc.), como de otros atributos (color, número de pasajeros, estado de mantenimiento, etc.). En cuanto al estado de la infraestructura se recogen datos meteorológicos y se emplean técnicas de detección de vehículos. Por último, las personas involucradas son los conductores, pasajeros y peatones, siendo el análisis del comportamiento de los conductores lo más importante.

La convergencia de esta información depende de las tecnologías de comunicación ITS, que pueden ser inalámbricas o por cable. En las comunicaciones inalámbricas se utilizan la radio, el satélite, la telefonía móvil y las comunicaciones de corto alcance. En la comunicación por cable la fibra óptica es lo más común.

- b) El soporte de aplicaciones de información de transporte. La interpretación y comprensión del comportamiento del tráfico, se puede considerar como un problema de clasificación de datos que varían en el tiempo. Se utilizan diversas técnicas, como la coincidencia de plantillas, estadísticas de probabilidad, deformaciones dinámicas de tiempo, el modelo oculto de Markov o redes neuronales.
- c) La gestión del transporte. Los sistemas de gestión y control del tráfico administran y controlan los flujos de tráfico mediante un esquema de gestión que incluye la vigilancia del tráfico, el control del tráfico, la gestión del transporte público, la gestión de emergencias y el control organizacional.

Otras aplicaciones de los sistemas ITS son el cobro electrónico de peajes, los sistemas de notificación de emergencia a bordo del vehículo, la vigilancia automática de infracciones, el control automático de carreteras, los límites variables de velocidad o los sistemas anti-colisión. Es importante destacar que los sistemas ITS se han desarrollado para un sistema de transporte de vehículos que son conducidos por personas.

En la actualidad se sigue trabajando en diferentes áreas de especial interés, como los vehículos conectados y las tecnologías V2V, las tecnologías de comunicación DSRC, satelital o Wi-Fi, los sistemas autónomos de conducción, el seguimiento de emergencias, la gestión y privacidad de datos mediante tecnologías de Big Data, o la interoperabilidad mediante la evolución de estándares y arquitecturas [69].

2.3. Legislación en materia de ingenios autónomos

La investigación, el desarrollo y la innovación son procesos que requieren de mucho tiempo hasta el momento en el que se obtienen soluciones y productos que pueden ser utilizados



por la sociedad. Es entonces, cuando surge la necesidad de crear una nueva legislación para regular una determinada tecnología, desconocida hasta la fecha. En la gran mayoría de ocasiones, el desarrollo tecnológico lleva años de ventaja respecto a desarrollo normativo, lo cual puede llegar a representar un freno para el progreso.

En este apartado se realiza un breve análisis de cuál es el estado de las diferentes legislaciones que existen en el ámbito de los ingenios autónomos, siendo diferentes dependiendo del sector en el que nos encontremos.

2.3.1. Legislación de la Conducción Autónoma

La historia de los vehículos autónomos tiene muchos años de antigüedad (apartado 2.2.2), pero no sería hasta la última década cuando realmente los avances conseguidos hicieron plantearse la necesidad de generar una normativa que regulase su circulación por vías públicas. A continuación, se analizan las legislaciones más destacadas en el ámbito internacional, así como el estado de la normativa española.

2.3.1.1. Regulación Internacional

A raíz de los buenos resultados obtenidos en los retos Grand Challenge organizados por el DARPA, y la continuación del trabajo de los diferentes equipos participantes, dando lugar a exitosas iniciativas empresariales, Estados Unidos se convirtió en el país líder del sector, además de pionero en el ámbito regulatorio.

La legislación norteamericana se inició en el ámbito estatal, para posteriormente desarrollarse en el ámbito nacional. En el año 2011 Nevada se convirtió en el primer estado en aprobar una ley de vehículos autónomos. Permitía realizar pruebas a los vehículos autónomos en sus vías, pero los vehículos debían estar registrados, asegurados y contar con un certificado de cumplimiento del Departamento de Vehículos a Motor del estado. Florida se convertiría en el primer estado en autorizar a cualquier conductor con licencia para operar vehículos autónomos en vías públicas. Esta ley de Florida, no requiere que un operador se encuentre en el vehículo, pero un operador remoto sí que ha de tener los medios necesarios para activar y desactivar la tecnología de conducción autónoma si fuese necesario. En California se autorizó la primera prueba de un vehículo completamente autónomo, que no esté equipado con volante, pedales de freno y acelerador en determinadas vías públicas. En el año 2016 Michigan promulgó cuatro proyectos de ley que permitían a los vehículos autónomos circular en vías pública, aliviaba las restricciones de prueba para los fabricantes, permitía el uso comercial de las tecnologías de conducción autónoma y estableció el Centro Americano de Movilidad, una infraestructura para la realización de pruebas de vehículos conectados y autónomos. Una de las normativas más curiosas se encuentra en Tennessee, que tiene una ley que prohíbe a los gobiernos locales prohibir el uso de los vehículos autónomos [74]. En el año 2012 hubo 6 estados que ya introdujeron legislación sobre vehículos autónomos. En el 2017 este número se había incrementado hasta los 33 estados. En el año 2020, al menos 41 estados habían elaborado legislaciones específicas sobre la conducción autónoma [75]. El 28 de noviembre de 2017 se presentó en el Congreso de Estados Unidos el proyecto de ley para regular los vehículos autónomos a nivel nacional, conocida como *AV Start Act*. Sus principales objetivos eran establecer un marco para definir el papel federal que garantizase la seguridad de los



vehículos altamente automatizados; evitar que los estados adoptasen, mantuvieran o hicieran cumplir leyes o normas que regulasen los vehículos autónomos respecto a determinadas áreas temáticas relativas a la evaluación de seguridad; establecer las condiciones bajo las cuales los vehículos altamente automatizados pueden introducirse en el comercio interestatal para la realización de pruebas, evaluaciones o demostraciones, y, por último, aplicar ciertas exenciones de seguridad a los vehículos autónomos [76].

En la Unión Europea, las iniciativas legislativas en materia de conducción autónoma se han dejado en mano de los diferentes países miembros. La UE se limita a emitir una serie de guías y recomendaciones para favorecer la acción legislativa en los diferentes estados. El país de referencia que lideró esta regulación fue España, que lo analizaremos con más detalle en el siguiente apartado. En el año 2015 Holanda modificó sus normas de tráfico para que se pudieran realizar pruebas en carreteras con vehículos autónomos, tanto coches como autobuses, siempre con un permiso de la autoridad competente. En 2017 en Suecia se designó a la Agencia de Transporte Sueca como responsable de la autorización de los permisos para realizar ensayos en todos los niveles de automatización en las carreteras del país. Ese mismo año, países como Estonia y Hungría adaptarían también sus respectivas normativas para regularizar las pruebas con vehículos autónomos. Alemania modificó su Ley de Tráfico por carretera en el año 2017, allanando el camino para la introducción segura de vehículos equipados con funciones automatizadas en carreteras públicas con tráfico [77]. En Francia la autorización de pruebas de conducción autónoma está sujeta a la orden gubernamental relativa a la prueba de “vehículos con autoridad de conducción delegada” de 2016, que ha de estar en conformidad con la Ley de Transición Energética de 2015. En el año 2018 se aprobó un decreto que limitaba dicha autorización a tres propósitos: pruebas para desarrollar tecnologías clave para la conducción autónoma o infraestructura vial conectada, la evaluación del desempeño en situaciones de la vida real y la demostración pública con el fin de sensibilizar a la sociedad y a las empresas [78].

El Reino Unido aprobó su ley de vehículos autónomos y eléctricos en el año 2018, conocida como AEV Act. Destaca que el gobierno creó un nuevo departamento específico, el Centro de Vehículos Conectados y Autónomos [79]. En el panorama internacional, la otra región del mundo que está apostando fuertemente por estas tecnologías es Asia. En China se siguió una estrategia similar, siendo diferentes gobiernos regionales los que se adelantaron en la generación de normativas en favor de los vehículos autónomos, hasta que en 2017 se lanzaron una serie de estándares nacionales que resolvían la problemática de las diferencias entre las distintas regiones [80]. En el caso de Japón, el gobierno del país realizó modificaciones en la Ley de Vehículos de Transporte por Carretera y en la Ley de Tráfico por carretera, a fecha de 2019, para posibilitar la circulación de vehículos autónomos con determinadas capacidades de autonomía. El gobierno trabaja en un plan de revisiones sucesivas para ir ampliando las capacidades permitidas en las vías públicas de estos vehículos inteligentes [81].

El avanzado estado de desarrollo tecnológico de la conducción autónoma está dando lugar a nuevas iniciativas regulatorias en diferentes lugares del mundo. En este apartado se han analizado algunas de las más relevantes hasta la fecha.



2.3.1.2. Regulación en España

España fue el país pionero en Europa a la hora de legislar los vehículos autónomos. Uno de los principales motivos de este liderazgo se remonta a la Convención de Viena sobre la Circulación Vial, organizada por las Naciones Unidas en el año 1968. En el artículo 8 de la citada Convención, se regula el papel de los conductores. En el punto primero se especifica: “*Todo vehículo en movimiento o todo conjunto de vehículos en movimiento deberá tener un conductor*”. En el punto quinto se añade: “*Todo conductor deberá en todo momento tener el dominio de su vehículo o poder guiar a sus animales*” [82]. Este artículo obliga a todo vehículo a tener un conductor, lo cual representa un problema jurídico a la hora de autorizar la circulación de vehículos autónomos. España fue firmante, pero no ha ratificado la Convención de Viena [83]. Este hecho posibilitó su rápida actuación legislativa en favor de la conducción autónoma.

En el año 2015, la Dirección General de Tráfico (DGT), a través de la Subdirección General de Gestión de la Movilidad, aprobó la Instrucción 15/V-113, que regula la “Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general”. España se convirtió así en el primer país europeo con una normativa nacional de conducción autónoma. De esta forma se autorizó a fabricantes o instaladores de la tecnología de conducción autónoma, a universidades y consorcios que participasen en proyectos de investigación la realización de pruebas y ensayos en vías públicas. La norma exige que cada vehículo autónomo tenga un conductor, pero puede estar bien en el propio vehículo o bien con control de manera remota [84].

El siguiente avance legislativo tuvo lugar en octubre de 2017, cuando el Congreso de los Diputados aprobó por unanimidad la “Proposición no de ley sobre el impulso y desarrollo del vehículo autónomo” (Ref. 162/000451). De esta manera se inició el proceso necesario para la creación de una ley nacional de conducción autónoma. Esta PNL supuso a su vez un importante paso para que diferentes administraciones locales y regionales desarrollasen sus propias iniciativas regulatorias.

La primera administración regional en apostar por el sector de la conducción autónoma fue la Junta de Castilla y León. En el año 2018 aprobó la Ley 9/2018, de 20 de diciembre, de transporte público de viajeros por carretera de Castilla y León. En su artículo 20 sobre conducción automatizada estipula: “1. *La Administración impulsará el despliegue e implantación de estrategias de movilidad automatizada y conectada que aumenten la eficiencia y la seguridad de transporte público de viajeros por carretera, mejoren los flujos de tráfico en la infraestructura vial y de comunicaciones y reduzcan los impactos medio ambientales. 2. De conformidad con lo establecido por la regulación estatal en materia de tráfico y seguridad vial, la Administración promoverá la realización de pruebas y ensayos de investigación con vehículos autónomos en las vías urbanas e interurbanas abiertas al tráfico*”. Es una ley comprometida con la transición hacia un nuevo modelo de movilidad, concordante con los cambios necesarios para solventar la problemática actual del transporte, expuesta al comienzo de este estado del arte. En su artículo 56 sobre los planes de movilidad sostenible, se estipula: “3. *En el caso de planes de movilidad basados en la innovación tecnológica, incluirán, ..., los siguientes elementos: a) Sistemas de propulsión limpia, orientados a la no contaminación o contaminación cero. b) Sistemas autónomos de navegación o circulación, orientados a la no siniestralidad o siniestralidad cero. c) Sistemas conectados de navegación o circulación, orientados al colapso circulatorio cero. d)*



Sistemas colaborativos orientados a la automatización del flujo circulatorio como garantía para un tráfico transparente en reemplazo del actual. e) La tecnificación de viales” [85].

En el ámbito local, el Ayuntamiento de León se convirtió el 18 de marzo de 2019, en el primer ayuntamiento en regular y autorizar las pruebas de conducción autónoma en los viales de la ciudad de León. Elaboró una normativa reflejada en un convenio con AUVSI Spain, la sede española de la mayor organización internacional dedicada al desarrollo de vehículos no tripulados y robótica. El Ayuntamiento de León se comprometió a su colaboración activa en la realización de todas aquellas pruebas y ensayos con vehículos autónomos que se realizasen en vías urbanas e interurbanas abiertas al tráfico, poniendo a disposición todos los medios personales y materiales necesarios para su realización [86].

2.3.2. Legislación de la Navegación Aérea Autónoma

La navegación aérea no tripulada tiene una larga historia, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.2.3, y, de manera concordante, también su legislación. La historia de la regulación de los vehículos aéreos no tripulados se remonta a historia de la regulación de la aviación tripulada. En concreto a uno de los momentos más importantes de la historia de la aeronáutica, el Convenio sobre Aviación Civil Internacional, que tuvo lugar el 7 de diciembre de 1944 en Chicago, organizado por las Naciones Unidas. En el artículo 8 se regulaba el uso de las aeronaves sin piloto:

“Ninguna aeronave capaz de volar sin piloto podrá volar sin piloto sobre el territorio de un Estado contratante sin una autorización especial de ese Estado y de conformidad con los términos de dicha autorización. Cada Estado contratante se compromete a asegurar que el vuelo de tales aeronaves sin piloto en regiones abiertas a aeronaves civiles se controle de manera que se evite el peligro para las aeronaves civiles” [87].

El principal objetivo de cualquier regulación en el sector de la aviación es conseguir y mantener los más altos niveles de seguridad.

2.3.2.1. Regulación Internacional

La regulación internacional en la aviación juega un papel fundamental. Cada país tiene sus propias entidades con las competencias de regular sus respectivos espacios aéreos. Pero es imprescindible que las normativas y regulaciones de los diferentes países sigan unos criterios y estándares comunes. Existen varias agencias y organizaciones internacionales destinadas a tal fin. Su constitución inicial estaba destinada a la regulación de la aviación convencional, y en los tiempos modernos se han encargado también de la aviación no tripulada.

La Convención de Chicago sería uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la legislación de la aviación. En ella se acordó la creación de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). La OACI está formada por 193 Estados signatarios del Convenio de Chicago, y su principal función es mantener una burocracia administrativa y especializada que facilite las interacciones diplomáticas, e investigar nuevas políticas de transporte aéreo e innovaciones de normalización de acuerdo con el mandato que recibe de los gobiernos.



En Europa está la Agencia Europea de Seguridad Aérea, conocida como EASA, por sus siglas en inglés (*European Aviation Safety Agency*), en funcionamiento desde el año 2002, constituida por la Unión Europea a partir de la antigua JAA (*Joint Aviation Authorities*). Su principal función es la unificación de los estándares comunes de aeronavegabilidad en los Estados miembro de la Unión Europea [88]. Por otra parte, está la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea, conocida como Eurocontrol, que se fundó en Bruselas en 1960. Es una organización paneuropea de carácter civil-militar dedicada a apoyar la aviación europea, compuesta por 41 Estados miembro [89]. En estados Unidos destaca la FAA (*Federal Aviation Administration*) fundada en el año 1926, cuya principal función es la administración del tráfico aéreo civil [90].

Recientemente se constituyó un organismo dedicado a los vehículos aéreos no tripulados, JARUS (*Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*), fundado en el año 2012. Es una plataforma que reúne la experiencia regulatoria de 59 países y trabaja junto a EASA y Eurocontrol. Su objetivo es “recomendar un conjunto único de requisitos técnicos, operativos y de seguridad para todos los aspectos relacionados con el funcionamiento seguro” de las aeronaves no tripuladas, especialmente en aquellas con una masa inferior a 150 kg [91], [92].

La utilización de drones en operaciones militares ha sido su aplicación más común. Es importante destacar que la legislación para este tipo de usos es diferente. El marco regulatorio de drones militares abarca tres áreas del derecho internacional: el derecho internacional humanitario, el derecho internacional de los derechos humanos y el derecho sobre el uso de la fuerza. En este ámbito es importante mencionar la Convención de la ONU sobre Ciertas Armas Convencionales, adoptada en 1980, que creó un grupo de expertos gubernamentales sobre tecnologías emergentes [91].

Hasta el año 2000, tras décadas de innovación e investigación, no se dieron las condiciones para el uso en aplicaciones civiles de los UAVs. Previamente las operaciones que se hacían con este tipo de aeronaves se regían por las regulaciones del aeromodelismo. Reino Unido y Australia fueron los primeros países que elaboraron regulaciones para aeronaves no tripuladas en el año 2002. No obstante, hasta el año 2012, la propagación de regulaciones nacionales sobre aeronaves no tripuladas se mantuvo muy limitada, pero a partir de este año la tendencia cambió. En paralelo a los esfuerzos nacionales por regular las aeronaves no tripuladas, las organizaciones internacionales tomaron sus iniciativas. En 2002 la antigua JAA junto con Eurocontrol establecieron de manera conjunta una “Task Force” con el objetivo de integrar los UAVs en el espacio aéreo europeo a través de la adopción de unos conceptos guía para la regulación de estas aeronaves [92]. Sería en el año 2006 cuando la OACI declaró la necesidad de desarrollar un marco regulatorio para los UAVs, con el objetivo de armonizar términos, estrategias y principios [93]. En el año 2007 la FAA la política de operaciones de aeronaves no tripuladas en el sistema del espacio aéreo nacional [53]. A partir del año 2008 EASA publicó varios documentos para el desarrollo de la política europea sobre UAVs. En 2012 la Comisión Europea creó el grupo de dirección europeo sobre RPAs (ERSG), formado por diferentes organizaciones y expertos en el sector, que recibieron el mandato de crear un plan para la integración de los UAVs civiles en el sistema europeo de aviación [92].

Un acontecimiento importante se produjo en Riga en marzo de 2015, cuando se publicó la Declaración de Riga sobre aeronaves pilotadas remotamente. Esta declaración incluía 5 principios importantes que debían guiar el marco regulatorio en Europa: 1) Los drones



deben ser tratados como nuevos tipos de aeronaves con reglas proporcionadas basadas en el riesgo de cada operación; 2) Es necesario desarrollar ahora las normas de la UE para la prestación segura de servicios; 3) Es necesario desarrollar tecnologías y normas para la plena integración de los drones en el espacio aéreo europeo; 4) La aceptación pública es clave para el crecimiento de los servicios con drones; 5) El operador de un dron es responsable de su uso [94]. La revisión en el año 2018 del Reglamento de Seguridad Aérea, conocido como Reglamento Básico, facultó a la Comisión Europea para regular los drones civiles. EASA tiene la responsabilidad de recopilar, analizar y publicar información de seguridad relativa a las operaciones con drones a nivel de la UE, quedando esta responsabilidad en los estados miembros a nivel nacional. Este nuevo reglamento incluye las primeras normas de la UE para drones, cubriendo aquellos con una masa operativa superior a 150 kg, pero excluyendo los drones militares, aduaneros, policiales o de extinción de incendios. En marzo de 2019 la Comisión Europea, en conjunto con EASA, adoptó las reglas que establecen los requisitos técnicos para desarrollar drones. Estas reglas aplican a los drones “los más altos estándares de seguridad alcanzados en la aviación tripulada [91].

2.3.2.2. Regulación en España

En España el organismo regulador es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), que vela para que se cumplan las normas de aviación civil en el conjunto de la actividad aeronáutica de España. Tiene las misiones de supervisión, inspección y ordenación del transporte aéreo, la navegación aérea y la seguridad aeroportuaria. Trabaja para que se cumplan las normas de seguridad en el transporte aéreo español, promover el desarrollo, establecimiento y aplicación de legislación aeronáutica nacional e internacional de seguridad aérea [95].

La primera regulación nacional sobre aeronaves civiles pilotadas por control remoto se publicó en el Boletín Oficial del Estado en julio de 2014. Se reguló así el uso en aplicaciones comerciales de aeronaves no tripuladas cuya masa máxima al despegue fuese inferior a 25 kg. Aquellas aeronaves con una masa superior a 25 kg debían estar inscritas en el Registro de matrícula de aeronaves y disponer de un certificado de aeronavegabilidad. Las aeronaves inferiores a 25 kg podían operar a una altura máxima sobre el terreno de 120 m y en un radio de 500 m dentro del alcance visual del piloto. Las aeronaves con certificado de aeronavegabilidad tenían su operación limitada a lo establecido en su correspondiente certificado [96]. Esta normativa sería actualizada en diciembre de 2017, mediante la publicación en el BOE del Real Decreto que regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto [97].

A partir del 31 de diciembre de 2020 comenzó a aplicarse la normativa europea de UAS, que está compuesta por:

- Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas.
- Reglamento de Ejecución (UE) 2020/639 de la Comisión, de 12 de mayo de 2020, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 en lo que concierne a los escenarios estándar de operaciones ejecutadas dentro o más allá del alcance visual.



- Reglamento de Ejecución (UE) 2020/746 de la Comisión, de 4 de junio de 2020, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 en lo que respecta al aplazamiento de las fechas de aplicación de determinadas medidas en el contexto de la pandemia de COVID-19.
- Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión, de 12 de marzo de 2019, sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas.
- Reglamento Delegado (UE) 2020/1058 de la Comisión, de 27 de abril de 2020, por el que se modifica el Reglamento Delegado (UE) 2019/945 en lo que respecta a la introducción de dos nuevas clases de sistemas de aeronaves no tripuladas [98].

2.3.3. Legislación de la Navegación Marina Autónoma

En comparación con el estado actual de la legislación de vehículos autónomos aéreos y terrestres, la legislación de vehículos marinos autónomos es la menos desarrollada y necesita un gran impulso en los próximos años.

La navegación marítima se ve afectada en gran medida por los tratados y relaciones internacionales, donde estos acuerdos y reglamentaciones juegan un papel fundamental. Hay dos acuerdos de gran importancia que hay que destacar. En primer lugar, la Convención de Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, también conocida como UNCLOS (*United Nations Convention on the Law of the Sea*), que tuvo lugar en 1970. Este tratado establece un régimen integral de ley y orden en los océanos y mares del mundo que determina las reglas que rigen todos los usos de los océanos y sus recursos [99]. El otro acuerdo internacional más destacado es el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes, conocido como COLREGs (*Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*), que tuvo lugar en 1972. Fue adoptado por la Organización Marítima Internacional, conocida como IMO (*International Maritime Organization*), y establece las reglas de navegación marítima reconocidas y estrictamente implementadas por todos los países del mundo [100].

La cuestión fundamental del estatus legal de los vehículos marinos no tripulados es la consideración que se haga de su definición en los derechos de navegación que poseen las embarcaciones en diferentes aguas. La definición que se hace en COLREGs se refiere a embarcaciones que, independientemente de su tipo, propósito, tamaño, forma o estructura, se pueden utilizar para el transporte por agua. Por lo tanto, los vehículos marinos no tripulados y autónomos están incluidos y sujetos a COLREGs.

En la navegación civil, las embarcaciones no tripuladas deberían tener los mismos derechos que las embarcaciones convencionales. El tipo de aguas en las que se navegue tiene una especial importancia desde el punto de vista regulatorio. En las aguas interiores los diferentes estados tienen soberanía absoluta y exclusiva. En las aguas territoriales cada estado tiene soberanía y puede monopolizar los derechos de transporte costero. Por lo tanto, las embarcaciones no tripuladas extranjeras no aprobadas no tendrían derechos de cabotaje y no se les permitiría operar en el transporte marítimo. Las aguas de jurisdicción nacional se refieren al exterior de las aguas interiores y las aguas territoriales, como la zona contigua y la zona económica exclusiva. Las embarcaciones que naveguen en estas aguas disfrutan del derecho que pertenece al “derecho libre de paso inocente” o “libertad limitada de los mares”. Las aguas internacionales no pertenecen a ningún país y están bajo la



jurisdicción de los países para un uso igualitario. Un vehículo no tripulado que navegue en aguas internacionales disfruta de la “libertad de los mares”, pero está sujeto a las leyes internacionales y las leyes del país del que tiene bandera [101].

En el año 2017, la IMO reconoció la necesidad de incluir las embarcaciones autónomas en su agenda, reconociendo que su Comité de Seguridad Marítima (MSC) debía tomar un rol proactivo de liderazgo, identificando aquellas regulaciones que se ven afectadas y necesitan ser adaptadas para las operaciones con vehículos autónomos [102]. Por su parte, el Comité Marítimo Internacional (CMI) creó el Grupo de Derecho Marítimo para Naves No Tripuladas, reconociendo que no es posible trasladar simplemente las normas existentes de la navegación tripulada a la navegación no tripulada. Aunque se pueden establecer paralelismos, las características de la navegación no tripulada generan la necesidad de nuevas regulaciones [103].

Los diferentes gobiernos son los que están desarrollando diferentes iniciativas, principalmente en los países nórdicos. La Autoridad Marítima de Dinamarca está invirtiendo en buques autónomos, además recientemente ha publicado un análisis previo de estas embarcaciones autónomas, así como un análisis de sus barreras regulatorias. Noruega definió la primera zona de pruebas para barcos autónomos en el fiordo de Thronheim. En Noruega también hay un grupo de interés llamado Foro Noruego de Buques Autónomos (NFAS), que estableció recientemente la Red Internacional de Buques Autónomos. El Centro Sueco de Competencia Marítima publicó un informe sobre la seguridad de los buques autónomos [104].

A nivel europeo, no existe ninguna regulación específica hasta el momento en materia de embarcaciones no tripuladas. Desde la Comisión Europea se han realizado diferentes proyectos, y se han emitido unas pautas desde el Parlamento Europeo, orientadas a la robótica en general [105].

En España hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna legislación específica en materia de embarcaciones no tripuladas o autónomas. No obstante, se han realizado diversos proyectos, por parte de centros de investigación, empresas navieras y astilleros, que han obtenido permisos especiales para la realización de determinadas pruebas.



3. ANÁLISIS DE LA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA EN EL TRANSPORTE Y PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA TESIS

La innovación tecnológica se ha convertido en uno de los pilares de cualquier sociedad avanzada en la actualidad. Sin embargo, por muy moderna que sea dicha sociedad, las grandes innovaciones, aquellas que son realmente disruptivas, se siguen enfrentando a la oposición y rechazo inicial por parte de numerosos agentes y colectivos. Estas innovaciones llevan asociadas consigo grandes revoluciones, que representan grandes cambios estructurales en la sociedad y la economía. Representan un factor de progreso y avance para unos, y un factor de peligro y temor para otros. Las bondades de la tecnología y sus beneficios suelen ser el motor que inspira a sus creadores, mientras que sus potenciales peligros y usos maliciosos son el argumento de sus detractores. En ambos casos, los intereses económicos suelen estar detrás de unos y otros. Cuando emerge una nueva tecnología se crea un nuevo mercado que muchos actores tratarán de dominar, y de manera casi inevitable, habrá mercados existentes que se verán perjudicados en mayor o menor medida.

La navegación autónoma, en cualquiera de los tres contextos, ha generado cierta controversia desde sus comienzos. Hace unos años se planteaba el debate si la irrupción en el mercado de vehículos autónomos representaría una evolución en el transporte o si realmente tenía el potencial para considerarse una revolución. Con el paso de los años, se fue adoptando por parte de los expertos la opción de que no solo sería una revolución, sino una de las más importantes de la historia. Las siguientes citas pertenecen a importantes personalidades del sector.

“La conducción autónoma representa la mayor revolución a día de hoy”. Brian Krzanich, CEO de Intel, 2017.

“En 10 años todos los coches que se fabriquen serán completamente autónomos”. Elon Musk, CEO de Tesla, 2017.

“Actualmente lo que me parece más emocionante es la tecnología de conducción autónoma, será mucho más disruptivo que la invención de la rueda, la invención de la electricidad e incluso que la propia invención del coche, porque irrumpirá en la vida de las personas mucho más que cualquier otra tecnología de la historia.” Thomas Frey, Fundador del Instituto DaVinci, trabajó más de 15 años en IBM para posteriormente convertirse en el futurólogo más valorado en Google, 2017.

Estas afirmaciones son sólo algunas de las numerosas que se han realizado recientemente por parte de diferentes personas relevantes. Utilizando un recurso literario, se podría decir que esta revolución es un tsunami. Un fenómeno de la naturaleza que arrasa con todo lo que se pone en su camino. Los expertos son capaces de detectar y predecir con cierta antelación los maremotos tectónicos, que originan los tsunamis. En una segunda fase, el mar comienza a retroceder, siendo un síntoma evidente de su inminente llegada. En la última fase, se atisba una ola gigante en el horizonte, momento en el cual, si no te has preparado con antelación para su llegada, es inevitable que te lleve por delante.

De manera previa a entrar en detalle, es conveniente analizar rápidamente algunas de las revoluciones más significativas que se han producido recientemente, de las cuales se puede aprender alguna lección.

Por razones evidentes, la primera de las revoluciones que se han de destacar es la del automóvil. Como se expuso en el apartado 2.2.1 el primer automóvil moderno data del año 1885, pero no sería hasta principios del siglo XX cuando se comenzó su fabricación en serie en Francia y Estados Unidos. La irrupción de una nueva tecnología cambiaría completamente el transporte terrestre tal y como se conocía, el automóvil destronó al coche de caballos en sus diferentes formas, que había monopolizado el transporte rodado durante tantos siglos. Fue un cambio que se produjo en un periodo de 20 años. Dos imágenes emblemáticas de este cambio corresponden a la ciudad de Nueva York.

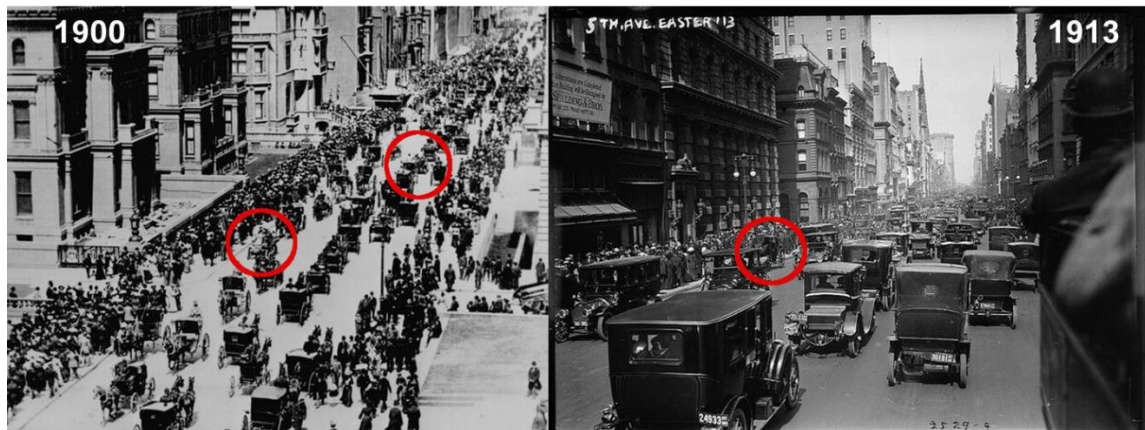


Figura 3. 1. Comparación de la transición del coche de caballos al automóvil de combustión en la ciudad de Nueva York [106].

Estas imágenes pertenecen a la quinta avenida de la ciudad de Nueva York. La fotografía de la izquierda es del año 1900, donde los coches de caballos monopolizaban el tráfico, apreciando dos de los primeros automóviles modernos. La fotografía de la derecha fue tomada en el año 1913, observando cómo se había revertido la situación, y apenas se ve un coche de caballos entre la multitud de automóviles.

Una de las reflexiones que mejor representaron este cambio radical en la forma de moverse la hizo Henry Ford cuando afirmó: “*Si hubiera preguntado a la gente qué quería, me habrían dicho caballos más rápidos*”. La principal lección que se puede aprender de la revolución del automóvil es que dos décadas bastaron para cambiar por completo la forma en que la humanidad se había desplazado por tierra durante dos milenios.

La segunda revolución que se analiza, más cercana en el tiempo, es la de Internet. A pesar de que sus inicios se dieron en la década de los 60, se puede considerar que ha sido en los últimos 25 años en los que Internet revolucionó el mundo. Cambió por completo la forma en la que las personas se comunican, aprenden, se informan, se relacionan o trabajan. Una de las claves del éxito de Internet ha sido la democratización de la información. En la web no existen niveles socioeconómicos, géneros, razas, horarios, distancias, y un largo etcétera. Internet nos adentró en la Era de la Información. Si hace 25 años le hubiéramos dicho a una señora de 83 años que vive en un pueblito de la montaña leonesa que podría estar hablando y viendo en tiempo real a su nieta que vive en Australia y que uno de sus hijos iba a mudarse al pueblo porque podría trabajar desde casa, ¿qué hubiera pensado?



El alcance real del impacto de Internet era inimaginable para sus propios creadores, y del gran aprendizaje que ha representado para la sociedad, se puede destacar la capacidad o potencial que tiene una nueva tecnología, cuyo planteamiento inicial está acotado a un determinado campo, de modificar por completo los hábitos más cotidianos de una sociedad.

La última revolución que destacamos en este breve análisis es la del Smartphone. El 29 de junio de 2007 Steve Jobs se presentó ante el mundo y dijo: “*Hoy vamos a hacer algo de historia...*”. Presentó el primer Smartphone, un teléfono revolucionario que además servía de iPod y se podría conectar a Internet. Surgieron muchas dudas al respecto, dudando sobre el potencial real de ese nuevo teléfono. Una de las más simbólicas fue la portada que le dedicó la prestigiosa revista Forbes a los pocos meses, donde se cuestionaba si realmente alguien sería capaz de destronar al rey de la telefonía móvil, que en aquella época era Nokia. Diez años después, Nokia vio reducido por tres su valor en bolsa, mientras que Apple lo multiplicó por diez.

La lección más importante que se puede aprender de la revolución del Smartphone es que por muy consolidado que tengas un modelo de negocio o por muy grande que sea un icono industrial, si no eres capaz de adelantarte al futuro y adaptarte a la irrupción de nuevas tecnologías, en cuestión de muy poco tiempo habrán aparecido nuevos actores que reviertan la situación de liderazgo.

La historia está repleta de otras revoluciones que también tuvieron gran impacto. Es importante extraer el aprendizaje obtenido en cada una de ellas con el objetivo de aplicarlo a las venideras, como es el caso de la navegación autónoma.

3.1. Nueva Era del Transporte (NERTRA)

La terminología empleada juega un papel fundamental en la comprensión y el entendimiento de nuevos conceptos. Una característica en el desarrollo tecnológico de los ingenios autónomos es su clara particularización por contextos. En la actualidad se podrían considerar como sectores independientes la conducción autónoma, la navegación aérea autónoma y la navegación marítima autónoma, a pesar de las numerosas similitudes que presentan entre sí. Del mismo modo que anteriormente se definió el concepto de ingenio autónomo para referirse a vehículos de los diferentes contextos, se empleará el término navegación autónoma. Entendemos por navegación autónoma la acción de desplazarse de un vehículo autónomo por sus propios medios desde un origen hasta un destino, sin ningún tipo de intervención humana, bien sea terrestre, aéreo o marino.

En el año 2017 en una conferencia celebrada en León, organizada por la sede española de AUJVI (*Association for Unmanned Vehicles Systems International*), se planteó por primera vez la necesidad de considerar estos sectores tradicionalmente separados por contextos, como un único sector. Se utilizó el término de Nueva Era del Transporte (NERTRA) para englobar a los diferentes ingenios autónomos y las tecnologías asociadas a la navegación autónoma. Las indicaciones publicadas a su conclusión abogaban por la necesidad de abordar el complejo reto de integrar los vehículos autónomos terrestres, aéreos, marinos e híbridos en la vida cotidiana de la sociedad [107].



NERTRA es el término más apropiado para referirse a la revolución de la navegación autónoma, que originará una nueva era, la era de los ingenios autónomos, sostenibles, conectados y colaborativos. El fundamento del éxito de esta revolución reside en estas cuestiones, su inmenso potencial para solucionar la problemática del transporte actual, analizada en el apartado 2.1.

La necesidad de cambiar la ingeniería de los vehículos convencionales es vital para obtener un transporte sostenible que no atente sistemáticamente contra la salud de las personas. Los vehículos eléctricos hace varios años que se han presentado como una de las alternativas más destacadas que permitirán alcanzar este objetivo. Las principales organizaciones y gobiernos internacionales hace muchos años que tienen como una cuestión estratégica la transición hacia una sociedad que reduzca notablemente las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, y en esta cuestión los vehículos eléctricos jugarán un papel decisivo [108]. La comunidad científica lleva años estudiando el impacto que tendrá la irrupción de estos vehículos en la reducción de gases contaminantes. En escenarios con una representación de vehículos eléctricos del 25% la reducción de la presencia de gases contaminantes es muy notable, y si se llega al 50%, se podría llegar a cifras sorprendentes, incluso del 10% de reducción de la contaminación ambiental [109]. El objetivo generalizado a medio y largo plazo por los diferentes gobiernos es completar el cambio de ingeniería en la totalidad de la flota de vehículos para que sea completamente sostenible. Los recientes anuncios realizados por diferentes países en relación con la prohibición de la fabricación y venta de vehículos de combustibles fósiles consolidan esta línea.

La irrupción de la electromovilidad plantea a su vez una serie de problemas y retos que han de resolverse para que se pueda completar esta transición. El principal reto que se plantea es la integración de los vehículos eléctricos en la Red Eléctrica de cada país. Por un lado, está la generación de la energía eléctrica, que debería evolucionar hacia la obtención por fuentes sostenibles. Otro de los grandes retos es el almacenamiento de esta energía, donde los últimos avances en la tecnología de las baterías han sido decisivos. Hay que tener en cuenta también la necesidad de una red de cargadores que permitan a los vehículos eléctricos operar en un territorio determinado, sin verse limitados por su autonomía. De la misma forma que es fundamental preparar la red para el escenario en el que cientos o miles de vehículos tengan que cargar sus baterías al mismo tiempo en una determinada región [110]. Al formar parte de la red, hay que tener en cuenta que los propios vehículos eléctricos también podrían actuar como suministradores de energía en aquellos momentos en los que no estuviesen operativos. Este concepto se conoce como V2G (*vehicle to grid*), cuando el vehículo eléctrico cede energía a la red. Otro de los factores que representa un inconveniente a la hora de una rápida transición es el coste de comprar un vehículo eléctrico en propiedad. En estos momentos su precio es considerablemente más elevado que el de un vehículo tradicional de las mismas prestaciones. Se estima que en la próxima década podrían llegar a la viabilidad económica para los usuarios [111]. No obstante, como analizaremos más adelante, la compra de vehículos en propiedad no será una de las cuestiones importantes de la NERTRA.

El objetivo de reducir las emisiones del transporte no se limita al sector terrestre. En la aviación hace mucho tiempo que se está trabajando para conseguir reducir las emisiones mediante la electrificación de diferentes partes. Es un concepto que se conoce como MEA (*More electric aircraft*). Las diferentes líneas de trabajo abarcan los sistemas de energía



eléctrica, el arranque del motor principal, las unidades de potencia auxiliar, los sistemas de control ambiental, los sistemas de generación de gas inerte de abordaje, la electrificación de los sistemas hidráulicos, y también, la electrificación de los motores principales. Es un reto complejo alcanzar las prestaciones de los sistemas propulsivos tradicionales, pero se espera que en la próxima década se puedan realizar vuelos con aeronaves completamente eléctricas [112]. Y de la misma manera, en la navegación marítima, las embarcaciones han comenzado a reemplazar la tecnología de propulsión mecánica por propulsión eléctrica [113].

Los vehículos autónomos tienen numerosas virtudes de gran relevancia para la sociedad, pero la más destacada es su potencial para reducir dramáticamente el número de accidentes que se producen en las calles y carreteras, y a su vez, el número de personas heridas y fallecidas. El error humano está detrás del 93% de los accidentes de tráfico. Las causas que explican este dato son el exceso de velocidad, las distracciones, el alcohol, las drogas, la fatiga, la conducción agresiva, la inexperiencia, la compensación excesiva, los tiempos de reacción lentos u otras deficiencias del conductor [114]. La cuestión no es que los vehículos autónomos sean perfectos, porque ni lo son ni lo serán. No existe la máquina o sistema perfecto. La cuestión importante es cuándo se alcanzará el nivel de desarrollo necesario para desplegar una flota de vehículos autónomos que sea lo suficientemente segura para dejar a los humanos fuera de la ecuación de la conducción. Esto representa un desafío interdisciplinar en el que muchas áreas requieren coordinación, como el hardware, el software, las comunicaciones, la gestión del tráfico, la robótica, la ingeniería de seguridad, la seguridad, las pruebas, el desarrollo legislativo o la aceptación social [115].

Hay un amplio consenso en la comunidad científica sobre la necesidad de realizar pruebas y test en escenarios reales para comprobar y demostrar que los vehículos autónomos son seguros. En el momento que se compruebe, avalándolo con datos reales, que los vehículos autónomos son más seguros que los vehículos convencionales, se planteará la cuestión ética de si debería permitirse conducir a las personas o no. Cuando eso suceda, lo normal es que se desarrollen fuertes políticas públicas para acelerar la llegada de flotas de vehículos autónomos. Estas políticas incluirán medidas como la prohibición de la fabricación de vehículos conducidos a partir de una determinada fecha, la declaración como actividad ilegal de la conducción en las vías públicas, la inversión en las infraestructuras necesarias para el despliegue de vehículos autónomos en el transporte público, la incentivación e incluso subvención de servicios de movilidad compartida, e incluso políticas para desincentivar la compra de vehículos en propiedad [116]. Uno de los objetivos establecidos para la conducción autónoma es reducir el número de fallecidos al 1% del nivel actual, acercándose de este modo al mismo orden de magnitud de los ocasionados en otros medios de transporte más seguros, como puede ser la aviación o el ferrocarril. Alcanzado este objetivo, se salvarán millones de vidas anualmente [117].

Además de la seguridad, los vehículos autónomos presentan una serie de beneficios de gran relevancia. La gestión energética que realizarán sus sistemas inteligentes permitirá alcanzar unos niveles de eficiencia que las personas no podrían. Esto se traducirá en un importante impacto económico y ambiental. El cambio que van a generar en la movilidad de las personas es otro de sus grandes impactos. Afectará sobre todo a la forma de desplazarse en las cortas y medias distancias, conectado los hogares con los centros de trabajo y ocio, con gran relevancia para el transporte público. Su consecuencia directa será un importante incremento en la accesibilidad [118]. Existen numerosos grupos de personas



a los que la movilidad autónoma les permitirá ser libres, y podrán desplazarse por sí mismos sin depender de nadie. La gente con algún tipo de discapacidad, los niños y adolescentes, la tercera edad, las personas que no conducen, y todas aquellas personas que por alguna razón o no pueden o no deben conducir [119]. En esta misma línea, para muchas personas la conducción es una actividad estresante y tediosa. Estos nuevos vehículos se convertirán en habitaciones móviles, salas de juegos, salones u oficinas. Podrán estar equipados con un set completo de funciones y servicios. Los vehículos autónomos ofrecerán a los pasajeros la posibilidad de trabajar, leer, descansar, dormir, ver la televisión entre otras muchas actividades [120].

En un escenario con una flota de vehículos autónomos y sostenibles se habría conseguido resolver dos de los graves problemas de nuestro transporte actual, la contaminación y la siniestralidad. Alcanzar este escenario es un cambio de una dimensión enorme. Sería un grave error no aprovechar la ocasión para resolver el tercer grave problema. Reemplazar el actual parque móvil por una flota de vehículos eléctricos y autónomos seguiría ocasionando problemas de congestión. A pesar de que existen estudios que defienden el potencial que tienen los vehículos autónomos para reducir los actuales niveles de congestión, se necesitan otro tipo de soluciones. En algunos de ellos se estima que con una penetración del 10% de los vehículos autónomos en el mercado se podría reducir hasta un 15% los retrasos. Otro estudio afirma que con una penetración del 50% se podrían reducir los retrasos hasta un 35%, atribuyendo un 4,5% la reducción de la congestión debida a la reducción de accidentes [114].

Uno de los principales problemas que ocasiona la congestión, tal y como se analizó en el apartado 2.1.3, es la enorme cantidad de vehículos que habitan las ciudades y carreteras. El actual modelo de transporte terrestre se fundamenta en el uso mayoritario del vehículo particular. La Nueva Era del Transporte cuestiona la eficiencia de este modelo y ofrece nuevas soluciones que son posibles gracias a la tecnología que incorporan los nuevos vehículos. Un estudio reciente elaborado en el MIT analizaba la flota de taxis de la ciudad de Nueva York, formada por 13.586 vehículos. Mediante un algoritmo para un sistema de viajes compartidos, y empleando vehículos de 10 plazas en lugar de las 5 actuales, lograban resolver la demanda de los usuarios con 2.000 vehículos, lo cual representa una reducción del 85% de la flota actual [121]. Otro estudio estima que, tras una década desde la irrupción de los vehículos autónomos en el mercado, en el año 2030 el 95% de los kilómetros recorridos por los pasajeros de Estados Unidos serán realizados en servicios de movilidad bajo demanda con vehículos autónomos y eléctricos de operadores de flota [122]. Por lo tanto, la revolución en el transporte se cuestiona la funcionalidad de los propios vehículos, planteando una nueva tendencia en el vehículo de referencia o mayoritario con un mayor número de plazas, además de plantear nuevos modelos de negocio, como los servicios de movilidad compartida o movilidad bajo demanda. En comparación con el coste que representa la adquisición de un vehículo en propiedad, el uso masivo de estos servicios se traducirá en una reducción considerable de los costes para los usuarios.

La combinación de los vehículos autónomos de los tres contextos en diferentes servicios y aplicaciones es otro de los principios fundamentales de la NERTRA. De esta forma se conseguirá alcanzar un sistema de transporte intermodal. El uso de los cielos de baja cota, para el transporte de personas y mercancías, en las distancias cortas y medianas será uno de los sectores con mayor desarrollo en los próximos años. Y sin lugar a duda, tendrá una contribución muy relevante en la reducción de la congestión terrestre. En resumen, para



solucionar la congestión, la solución pasa por la automatización del tráfico en los tres contextos, que es el objetivo principal de esta tesis doctoral.

En definitiva, el objetivo que busca la Nueva Era del Transporte es obtener un nuevo patrón de movilidad, conocido como Triple Cero Más (NPM 000+), es decir, Cero contaminación, Cero Siniestralidad, Cero Embotellamiento y Más renta disponible por habitante [107].

3.2. Hipótesis

El estudio del Estado del Arte y el análisis de la revolución tecnológica que se espera en el transporte permiten establecer y justificar las hipótesis de partida con las que se ha trabajado en el desarrollo de esta tesis doctoral.

1. **Electrificación del parque móvil.** Los graves problemas de salud que afectan a buena parte de la población a consecuencia de la contaminación necesitan soluciones urgentes. Se asume por tanto que el actual parque móvil será reemplazado en su totalidad por vehículos sostenibles, en su gran mayoría eléctricos, sin descartar la aparición de nuevas tecnologías de propulsión sostenibles.

2. **Ingenios con autonomía total.** Con décadas de trabajo en el desarrollo de vehículos autónomos, tanto terrestres, aéreos como marinos, numerosos demostradores exitosos y casos de éxito reales, se asume que se alcanzará el nivel de autonomía para que los ingenios sean completamente autónomos con todas las garantías de seguridad. De esta manera, las personas quedarán completamente fuera de las tareas de navegación.

3. **Automatización del parque móvil.** El elevado número de accidentes que se producen en las carreteras de todo el mundo, y sus dramáticas consecuencias, refuerzan la necesidad de una tecnología que remedie esta situación. En combinación con la hipótesis anterior en la que se alcanza la navegación autónoma segura, se puede asumir que el actual parque móvil será reemplazado por completo por vehículos autónomos.

4. **Intermodalidad.** La combinación de diferentes modos de transporte autónomos, cada uno con sus beneficios particulares, permitirá obtener un sistema de transporte integral, y de esta forma poder explotar su gran potencial. Se asume la intermodalidad como una característica necesaria y fundamental del nuevo modelo de movilidad.

5. **Aceptación social.** Los grandes cambios, aquellos que afectan a costumbres profundamente instauradas en una sociedad, son procesos complejos y se enfrentan al rechazo de determinados sectores. La experiencia obtenida de otras revoluciones que, a pesar de las reticencias iniciales la población, adoptó los cambios con gran velocidad y, sobre todo, los grandes beneficios que ofrece la tecnología de navegación autónoma, permiten que se asuma una pronta aceptación de la sociedad.

5. **Evolución de los modelos de negocio.** Las posibilidades de esta nueva tecnología dan lugar a la aparición de nuevos modelos de negocio como alternativa a los tradicionales, de los cuales el más representativo es la tenencia en propiedad de vehículos. Se asume que los servicios de movilidad bajo demanda, movilidad compartida o movilidad como servicio se asentarán como mayoritarios, dejando en un lugar residual a los tradicionales.



6. **Implicación de las instituciones.** Las administraciones gubernamentales y las diferentes instituciones con competencias en el transporte tienen la responsabilidad de guiar y fomentar la innovación tecnológica. A pesar de que el desarrollo legislativo y el apoyo financiero que se requiere, por parte de estas organizaciones, suele ir con varios años de retraso en comparación con el desarrollo tecnológico, se asume que en algún momento cercano las administraciones e instituciones asumirán el cambio y realizarán el trabajo que les corresponde.

3.3. Transición

Expuestas las hipótesis iniciales sobre las que se comienza el desarrollo conceptual de la tesis, se puede obtener una primera conclusión. La migración del actual parque móvil hacia uno compuesto por ingenios eléctricos y autónomos requiere un periodo de evolución, en el que estos nuevos vehículos se irán incorporando progresivamente a la circulación en las diferentes calles y carreteras. Este periodo se conoce dentro del sector como transición.

La transición hacia la Nueva Era del Transporte es una cuestión de gran importancia por diferentes motivos. En un enfoque global, es un periodo en el que se producirá una gran revolución en el transporte. Desde un punto de vista técnico, representa un gran reto para la tecnología de la conducción autónoma, que tiene que desarrollar herramientas y capacidades extra, para convivir con vehículos de comportamientos impredecibles (conducidos por personas). En un escenario donde sólo hubiera vehículos autónomos el reto de la navegación sería más sencillo. En el apartado social será el periodo en el que la gente se acostumbre a estos ingenios como parte de su día a día. Desde el punto de vista legislativo, las diferentes administraciones tendrán que desarrollar nuevas leyes y modificar las existentes, para regular este nuevo sector emergente. En el ámbito económico muchas empresas y modelos de negocio tendrán que adaptarse a los nuevos ingenios, y no exclusivamente aquellos negocios relacionados con el transporte, ya que el transporte es uno de los pilares de gran parte de las actividades económicas de un país.

Estos motivos, entre otros, han dado lugar a numerosas discusiones sobre cómo ha de hacerse esta transición y cuánto tiempo durará. El debate en la cuestión temporal ha ocasionado opiniones muy dispares, desde aquellos que estiman que se producirá en apenas una década, y otros que prevén que pueda tardar 50 años en culminarse. Realizar una estimación precisa del tiempo necesario para completar la transición es una cuestión compleja que depende de muchos factores, siendo los más relevantes:

- Nivel de desarrollo tecnológico. En la actualidad los sistemas autónomos de los ingenios están en las últimas fases de desarrollo para alcanzar la autonomía completa. Dependiendo de la compañía que lo desarrolle, se encuentran más o menos avanzados. Los más aventajados coinciden en encontrarse en la fase final de experimentación en escenarios reales.
- Certificación. Completado el desarrollo tecnológico los ingenios tendrán que pasar el proceso de certificación, que garantice que tienen un nivel de seguridad muy elevado y puedan comenzar a emplearse en servicios comerciales.
- Capacidad de fabricación. Una vez que se haya obtenido la tecnología y que se haya certificado, es necesario diseñar el proceso de fabricación para su producción



en serie. Se trata de un proceso complejo y costoso, que requiere de fuertes inversiones.

- Capacidad de adaptación de la industria. Una de las características de la ingeniería de los nuevos ingenios es que no se parece prácticamente en nada a la de los vehículos convencionales. Las fábricas de la industria automotriz no son válidas para la producción de estos nuevos ingenios, requieren de fuertes modificaciones que les permitan adaptarse para la producción de estos ingenios. Es una cuestión que afecta tanto a la industria de automoción como a la industria auxiliar de equipos y componentes.
- Dualidad entre industria convencional y empresas tecnológicas. En el diseño de los nuevos ingenios, tanto el software como el hardware tienen un papel fundamental. La inacción y el escepticismo por parte de la industria de automoción durante las últimas décadas ha provocado que la propiedad intelectual de gran parte de la ingeniería de los vehículos pertenezca a las empresas tecnológicas que se adelantaron en el desarrollo de los sistemas autónomos. La industria convencional intentará ralentizar al máximo la transición, con el objetivo de rentabilizar las inversiones realizadas, y por su parte el sector tecnológico hará todo lo posible por acelerar dicha transición. Dependiendo de la fuerza y la capacidad de influencia de estos sectores en cada región, el cambio se producirá a un ritmo u otro.
- Desarrollo legislativo. Desde las etapas iniciales de la transición las leyes y normas que permitan la realización de las primeras pruebas experimentales, la creación de proyectos piloto y circuitos experimentales, la realización de servicios comerciales, o la consolidación de legislaciones nacionales, tienen un papel fundamental.
- Políticas de incentivos. Además del apoyo legislativo en relación con las normativas para la navegación autónoma, la creación de políticas que favorezcan el cambio tiene un rol muy importante. Estas políticas consisten en estímulos para la industria que desarrolle los nuevos ingenios, que pueden ir desde subvenciones, apoyo a la I+D o beneficios fiscales, así como en una serie de incentivos a los usuarios, favoreciendo tanto la compra de nuevos ingenios como la utilización de servicios de movilidad autónoma. Las políticas punitivas hacia la tecnología obsoleta tendrán también su papel importante, tal y como ya está sucediendo hacia los automóviles más contaminantes.
- Aceptación social. De la misma forma que ha ocurrido en las últimas revoluciones tecnológicas, se espera que el grado de aceptación social sea muy elevado en cualquier lugar del mundo. Una tecnología que mejora nuestra calidad de vida es siempre bien recibida en cualquier sociedad. No obstante, en las fases iniciales esta aceptación social sí que jugará un papel más determinante. Aquellas regiones donde este nivel de aceptación sea muy superior a las posibles reticencias o rechazo de determinados colectivos, verán muy favorecida la velocidad de la transición.
- Gravedad de los problemas. En aquellos países o regiones donde la gravedad de los problemas como la contaminación, la siniestralidad o la congestión sea muy acentuada, por razones de pura necesidad, se fomentará que la transición se realice a la mayor brevedad posible. Si pensamos en lugares como Singapur o China, donde es una cuestión capital, la migración hacia el nuevo modelo apenas durará una década.

La combinación de estos factores hace que la región en la que nos encontremos sea clave para determinar si el ritmo de la transición es uno u otro. En cualquier caso, será un proceso que por lo general será lo más corto que las circunstancias lo permitan. En el desarrollo de esta tesis es irrelevante que la transición dure cinco años más o menos. Lo importante es saber que se va a producir, y centrarse en el desarrollo de ese nuevo sistema de movilidad.

La respuesta a cómo ha de hacerse la transición depende de dos factores principales. El primero son las pruebas experimentales que se realicen con vehículos autónomos en escenarios reales, que permitan obtener una gran cantidad de datos, de los cuales se pueda extraer conocimiento y aplicarlo en las estrategias más apropiadas. El segundo, y quizás más importante, es saber cómo es el nuevo modelo de transporte que se tendrá al culminar la transición. Conocer el propósito final es imprescindible en cualquier proceso o proyecto.

Utilizando como indicador el crecimiento a lo largo del tiempo de los ingenios en el parque móvil, o la cuota de mercado que representan, se puede realizar una clasificación en fases de la transición hacia la Nueva Era del Transporte.

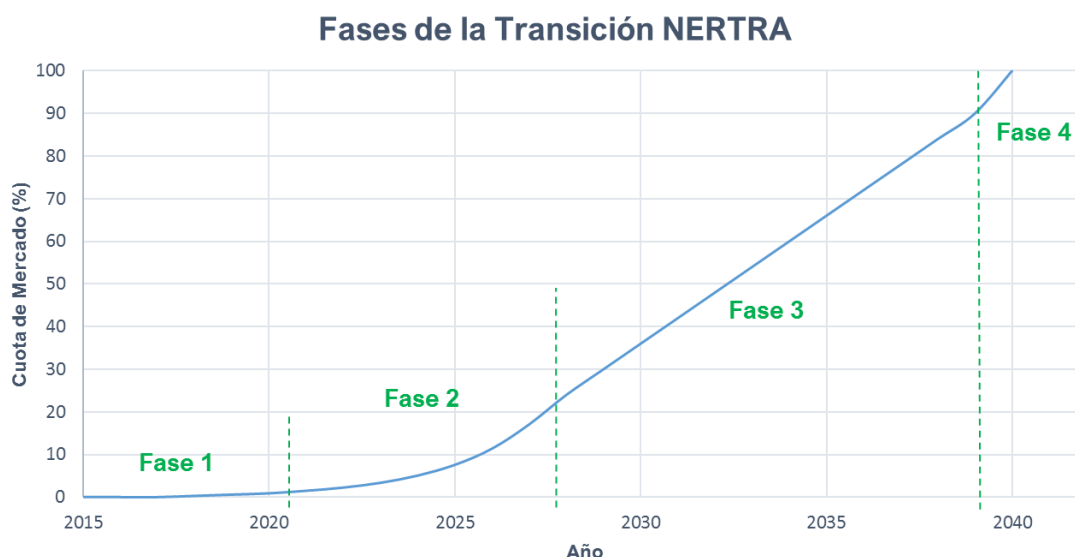


Figura 3. 2. Fases de la Transición NERTRA.

En la figura 3.2 se muestra la gráfica de las diferentes fases que compondrán esta transición. Son las siguientes:

1. Fase 1. Esta es la fase inicial o fase experimental, en la que los primeros vehículos autónomos comienzan a circular en situaciones de tráfico real con carácter experimental, para realizar diferentes test y pruebas. En esta fase, diferentes compañías, universidades y grupos de investigación trabajarán en las últimas etapas para conseguir un sistema autónomo con todas las garantías de seguridad necesarias para su entrada en el mercado.
2. Fase 2. Esta segunda es la fase en la que se inician los primeros servicios comerciales con vehículos autónomos. Será un periodo de intensos cambios legislativos, en el que posiblemente se inicien servicios comerciales de manera previa a que haya legislaciones nacionales consolidadas. Será en esta fase cuando



- se consiga la certificación de los diferentes sistemas de navegación autónoma, que representará el verdadero punto de inflexión para su gran crecimiento.
3. Fase 3. Es la fase de consolidación en el mercado y crecimiento constante de los ingenios autónomos. Bien por una cuestión normativa o bien por una cuestión estratégica (más lógica), llegará el momento en el que los diferentes fabricantes únicamente produzcan vehículos autónomos. Es el proceso que llevará más tiempo, puesto que no solamente es necesario que se alcance esta capacidad de producción, sino que debe producirse el reemplazo de la actual flota de vehículos, y teniendo en cuenta que la vida media de un vehículo particular está en 12 años, es sensato pensar que se otorgue un plazo de ese orden de magnitud para tratar de amortizar al máximo las inversiones realizadas.
 4. Fase 4. Esta última fase es la de imposición legislativa. De la misma manera que ha sucedido con otras tecnologías a lo largo de la historia, los diferentes gobiernos prohibirán la circulación de los vehículos conducidos por personas en favor del interés común que garantice la movilidad segura y eficiente para el conjunto de la población. Se establecerá una fecha determinada a partir de la cual únicamente podrán circular ingenios autónomos en una determinada región, dando un plazo para que se produzca este cambio.

3.4. Planteamiento teórico

La ingeniería es una disciplina muy antigua, de noble y distinguida tradición, cuyos orígenes se podrían remontar a la Prehistoria, cuando los primeros hombres crearon las primeras herramientas e instrumentos de caza. En la actualidad la ingeniería abarca áreas de conocimiento muy diversas, con altos grados de hiperespecialización en cada una de ellas. Sin embargo, la hiperespecialización tiene sus puntos negativos, como la pérdida de perspectiva de otras áreas de conocimiento. Por ello, la ingeniería multidisciplinar juega un papel fundamental en el planteamiento estratégico de prácticamente cualquier proyecto con impacto, y más aún, en aquellos de gran envergadura con una gran repercusión social y económica, como es el caso de la navegación autónoma.

Existe una corriente de pensamiento en el ámbito económico que considera que es el propio mercado el que guía la evolución de los diferentes sectores. Aplicada a este caso, las diferentes compañías que comiencen a ofrecer los servicios de movilidad autónoma y los propios clientes, serán los que guiarían la evolución y crecimiento del sector. En esta tesis se está en contra de esta teoría en el sector del transporte. Teniendo en cuenta que el transporte es la base de la actividad económica de cualquier país y un sector estratégico, afrontar una revolución de semejantes dimensiones confiando en la evolución del propio mercado sería una decisión tremendamente arriesgada. Un sector estratégico requiere de una planificación estratégica, que es uno de los mayores activos que proporciona la ingeniería hoy en día. La capacidad de diseñar el futuro con objetivos y propósitos claros y concretos que permitan resolver problemas y ofrecer soluciones que mejoren la calidad de vida de las diferentes sociedades.

Imaginemos una clase universitaria de una escuela de ingenierías donde el profesor divide a sus alumnos en dos grupos, y plantea un proyecto diferente a cada uno como trabajo práctico. En ambos casos, la base de partida es la misma, y consiste en el diseño de una nueva ciudad. En el caso del primer grupo de alumnos, se trataría de una ciudad para una



sociedad del siglo XX, en el que tendrían que diseñar el sistema de transporte para la ciudad orientado a vehículos que son conducidos por personas. En cambio, el segundo grupo de alumnos trabajaría sobre una sociedad del siglo XXI, en el que la tecnología ya ha conseguido obtener vehículos inteligentes capaces de realizar la navegación por sí mismos sin ningún tipo de intervención humana. Su misión sería diseñar el sistema de transporte para esta ciudad. Expuestos ambos supuestos, ambos grupos comenzarían a trabajar durante los meses que dura la asignatura en el diseño de ambas ciudades. Llegado el último día de clase, tendrán que exponer sus proyectos. ¿Se parecerán en algo los sistemas de transporte de ambas ciudades? ¿Afectará este sistema de transporte al diseño de otras partes de la ciudad?

Resulta sencillo imaginar que las diferencias entre ambos proyectos serán muy considerables, y que la importancia que tiene el transporte en cualquier sociedad juega un papel capital. Este ejemplo simple refleja muy bien la cuestión de fondo que está detrás de la transición hacia la nueva movilidad NERTRA. Lo que va a ocurrir en los próximos años es la evolución hacia una movilidad que cambiará por completo la forma en la que las personas se mueven. La diferencia entre ambos modelos será sustancial, y este es el objetivo de la tesis, centrarse en el diseño conceptual del nuevo modelo de movilidad, para saber cuál es el objetivo hacia el que avanzamos, que permita adoptar las mejores decisiones a lo largo de la transición y así evitar dar pasos en falso.



4. AUTOMATIZACIÓN DEL TRÁFICO

La acción de automatizar consiste en convertir ciertos movimientos en movimientos automáticos o indeliberados, de acuerdo con la definición de la RAE. Se puede definir la automatización como la aplicación de máquinas o procedimientos automáticos en la realización de una tarea, actividad o proceso.

El primer paso que se dio por la humanidad fue la utilización de herramientas para facilitar la realización de diferentes tareas. El siguiente paso fue la sustitución de las labores físicas realizadas por las personas por máquinas. Estas máquinas se crearon para realizar tareas muy dispares, siendo el transporte una de las más relevantes, tal y como se analizó en el apartado 2.2. La primera Revolución Industrial representó el auge de los diversos procesos de automatización, aplicados principalmente a procesos industriales. La automatización es un proceso complejo, tanto desde un punto de vista técnico como desde un punto de vista económico, ya que requiere de inversiones muy importantes. Pero la clave del éxito de la automatización es que dispara la productividad y eficiencia de las diferentes tareas, actividades o procesos a los que se aplica. Esta rentabilidad permite abordar los elevados costes iniciales que conlleva.

Una de las lecciones que nos brinda la evolución de la tecnología es que toda tarea, actividad o proceso que se ha podido automatizar se ha acabado automatizando. La primera pregunta que hay que formular es: ¿por qué no se ha automatizado el tráfico? La respuesta es relativamente sencilla. Porque hasta la actualidad no se había desarrollado la tecnología que permitiese abordar la automatización del tráfico. La conducción es una actividad realmente compleja, que las personas realizan con relativa facilidad. Es importante darse cuenta de que las personas somos organismos o “máquinas” extremadamente complejos con unas capacidades muy elevadas. Desarrollar una máquina que no solamente iguale las mismas capacidades que tendría el mejor conductor, sino que las mejore, es un reto de una dificultad extraordinaria. Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto a lo largo de esta tesis, se ha conseguido, tras varias décadas de intenso desarrollo tecnológico en sectores muy diversos, obtener la tecnología que permite a los vehículos circular por sí mismos. Y es en este momento, cuando se consigue que el vehículo sea autónomo, cuando se puede plantear la automatización del tráfico (formado por un gran conjunto de vehículos).

La siguiente pregunta que hay que hacerse es: ¿qué se necesita para la automatización del tráfico? Antes de responder a esta pregunta es necesario acotar el ámbito donde se quiere automatizar el tráfico y el tipo de tráfico que se quiere automatizar. En nada se parece automatizar el tráfico en un circuito cerrado, que el tráfico en una ciudad pequeña, o el tráfico en una autopista, o el tráfico en una gran megalópolis, o el tráfico aéreo o marítimo. Cada escenario por separado tendría sus particularidades y requisitos específicos, pudiendo dar lugar a significativas diferencias de un sistema a otro. El enfoque de esta tesis es global, desde una perspectiva holística. Se aborda la automatización del tráfico en su conjunto y totalidad, tomando como referencia el ámbito nacional, e incluyendo la navegación multicontexto (terrestre, aérea y marítima). Se establece España como referencia con el objetivo de obtener un modelo escalable y replicable en otras naciones.



La automatización del tráfico en su conjunto tiene tres requisitos principales para que pueda desarrollarse un sistema autónomo de navegación seguro y eficiente:

1. Ingenios. El primer requisito para automatizar la circulación de un conjunto de vehículos, que circulan por un determinado lugar, es que estos vehículos estén equipados con la tecnología que permita la automatización de su navegación. No se podría plantear la automatización de un conjunto de vehículos que estuviesen conducidos por personas, ya que las personas no tenemos suficiente capacidad para procesar: ni la cantidad de información, ni la velocidad de ejecución, ni la fiabilidad sostenida necesarias para dicha tarea. Es imprescindible por tanto que los vehículos sean completamente autónomos.
2. Gestión autónoma del tráfico. A diferencia de la automatización de un vehículo, el objetivo es la automatización del conjunto de vehículos. Por lo tanto, resulta necesaria la tarea de gestión del tráfico, que posibilite la automatización de los distintos flujos de circulación. La gestión de las rutas de cientos o miles de vehículos, que circulan de manera simultánea en un determinado escenario, origina ingentes cantidades de datos que es necesario procesar en tiempo real. Es una tarea para la que las personas no están preparadas, siendo necesario nuevamente la tecnología para resolverla. Esta gestión del tráfico ha de estar automatizada.
3. Red de comunicaciones. La automatización requiere que los diferentes ingenios sean cooperativos, siendo necesario que estén equipados con sistemas de comunicaciones, que permitan la interacción con otros vehículos, con la infraestructura y con los centros de gestión de tráfico. En sistemas a gran escala, como puede ser una ciudad o un país, estas comunicaciones requieren de una red propia para dar cobertura a todos los ingenios.

El diseño de un sistema de transporte autónomo estará sustentado en estos tres pilares como partes fundamentales. Cada una de ellas requerirá un complejo desarrollo para alcanzar las prestaciones que permitan esta automatización global del tráfico. El diseño conceptual será analizado y descrito en el capítulo 5 de esta tesis doctoral.

De manera previa a entrar en el propio diseño, es conveniente realizar un análisis de las diferencias entre la automatización de un vehículo y la automatización del tráfico. Hay que comprender las expectativas que se tienen sobre las capacidades que se espera tengan los vehículos autónomos, y analizar si son suficientes para poder formar parte del sistema que permita la automatización del tráfico.

4.1. Análisis de las capacidades y prestaciones de los vehículos completamente autónomos en la actualidad

La perspectiva global del transporte de esta tesis da lugar a considerables diferencias entre los vehículos de los distintos contextos. De igual modo, los estándares o clasificaciones sobre la tecnología de los vehículos autónomos terrestres, aéreos o marítimos son muy diversos, teniendo en cuenta que hasta la fecha han sido considerados sectores independientes y su evolución histórica ha seguido caminos separados. En algunos casos existen estándares muy desarrollados, y en otros o no existen o están en fases muy iniciales.



4.1.1. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos terrestres

La automatización de los vehículos ha sido un proceso progresivo en el que se han ido incorporando diferentes tecnologías para dotar a los vehículos de mayores grados de inteligencia. Desde los primeros automóviles que no contaban con ningún tipo de ayuda para el conductor, hasta el vehículo completamente autónomo, se ha producido una notable evolución. Es muy importante comprender bien qué se entiende por vehículo autónomo. En este sector se ha tomado la referencia establecida por la Sociedad de Ingenieros de Automoción, conocida como SAE (*Society of Automotive Engineers*). A continuación, se analiza la guía de prácticas recomendadas por la SAE, en la que se describen los sistemas de conducción autónoma [123].

Existen definiciones detalladas para los 6 niveles de conducción autónoma contemplados en la actualidad, cuyo ranking va desde la ausencia de ningún tipo de ayuda a la conducción (nivel 0), a la conducción autónoma completa (nivel 5). La elaboración de estos niveles requiere una definición de los actores principales que participan en la tarea de conducir: el usuario (persona), el sistema de conducción autónoma o sistema autónomo, y otros sistemas y componentes del vehículo. Los diferentes niveles se refieren al rol desempeñado por cada uno de estos actores en la tarea de la conducción autónoma.

Es importante consolidar una serie de conceptos básicos para poder comprender bien las diferentes definiciones, siendo los más relevantes:

- Tarea dinámica de conducción o DDT (*Dynamic Driving Task*). Todas aquellas funciones operativas y tácticas en tiempo real requeridas para operar un vehículo en tráfico en carretera, excluyendo funciones como la planificación de viajes o la selección de destinos o puntos de ruta. Incluye el control del movimiento lateral, control del movimiento longitudinal, supervisión del entorno mediante la detección, reconocimiento, clasificación y preparación de respuesta a objetos y eventos, la ejecución de respuesta a objetos y eventos, la planificación de maniobras y la mejora de la visibilidad mediante iluminación, señalización, gestos, etc.
- *Fallback* o recuperación del vehículo. Es la respuesta del usuario para tomar el control del vehículo o lograr una condición de riesgo mínimo después de que ocurra un fallo del sistema relevante para la DDT.
- Dominio de diseño operativo o ODD (*Operational Design Domain*). Condiciones de funcionamiento bajo las cuales un sistema de conducción autónoma determinado está diseñado para funcionar. Están incluidas, entre otras, las restricciones ambientales, geográficas, hora del día, la presencia o ausencia de tráfico, etc.
- Sistema Autónomo (SA) o ADS (*Automated Driving System*). El hardware y software que son capaces colectivamente de realizar toda la DDT de manera sostenida, independientemente de si se limita a un ODD específico. Generalmente se emplea para los niveles 3, 4 y 5.
- Vehículo convencional. Un vehículo diseñado para ser operado por un conductor convencional.
- Conducción autónoma. El desempeño mediante sistemas de hardware y software de parte o la totalidad de la DDT de manera continuada.
- Detección y respuesta ante objetos y eventos o OEDR (*Object and Event Detection and Response*). Son las subtareas de la DDT que incluyen la monitorización del



entorno de conducción (detectar, reconocer y clasificar objetos y eventos y prepararse para responder según sea necesario) y ejecutar una respuesta adecuada a dichos objetos y eventos.

En base a estos conceptos fundamentales que describen una taxonomía de la automatización de la conducción, se definen seis niveles discretos y mutuamente excluyentes:

- **Nivel 0.** Sin automatización de la conducción. El conductor se encarga por completo de la DDT, incluso cuando hay sistemas de seguridad activados.
- **Nivel 1.** Asistencia al conductor. El sistema automatizado se encarga de la ejecución sostenida y específica de un ODD de las subtareas de control lateral o longitudinal del vehículo (pero no ambas de manera simultánea), con la expectativa de que el conductor realice el resto de la DDT.
- **Nivel 2.** Automatización parcial de la conducción. El sistema autónomo se encarga de la ejecución sostenida y específica de un ODD de las subtareas de control del movimiento lateral y longitudinal de manera simultánea, con la expectativa de que el conductor se encargue de la subtarea de la OEDR.
- **Nivel 3.** Automatización condicional de la conducción. El sistema autónomo se encarga del desempeño sostenido en un ODD específico de toda la DDT, con la expectativa de que el usuario esté listo para ejecutar el Fallback ante las solicitudes de intervención emitidas por el SA, así como para los fallos del sistema relevantes para el desempeño de la DDT.
- **Nivel 4.** Alta automatización de la conducción. El sistema autónomo se encarga de la ejecución sostenida en un ODD específico de toda la DDT, incluida la recuperación del vehículo o Fallback, sin ninguna expectativa de que el usuario tenga que responder a una solicitud de intervención.
- **Nivel 5.** Automatización completa de la conducción. El sistema autónomo realiza el desempeño sostenido e incondicional (es decir, sin estar sujeto a un ODD específico) de la tarea de DDT al completo y recuperación, sin ninguna expectativa de que el usuario tenga que responder a una solicitud de intervención.

Tabla 4. 1. Características de los niveles de automatización SAE de los vehículos.

Nivel	Nombre	DDT		Fallback	ODD
		Control lateral y longitudinal del vehículo	OEDR		
0	Sin Automatización de la conducción	Conductor	Conductor	Conductor	-
1	Asistencia al conductor	Conductor y Sistema	Conductor	Conductor	Limitado
2	Automatización parcial de la conducción	Sistema	Conductor	Conductor	Limitado
3	Automatización condicional de la conducción	Sistema	Sistema	Conductor en Fallback	Limitado
4	Alta automatización de la conducción	Sistema	Sistema	Sistema	Limitado
5	Automatización completa de la conducción	Sistema	Sistema	Sistema	No limitado



En la Tabla 4. 1 se recogen las principales características en base al desempeño de las tareas fundamentales de los diferentes niveles. El salto tecnológico en las capacidades del sistema autónomo se produce del nivel 2 al nivel 3, siendo en este último en el que el vehículo empieza a tener altas capacidades de autonomía en su navegación. No obstante, un vehículo completamente autónomo no podría considerarse hasta los niveles 4 y 5 en base a estas definiciones. La característica que tiene un sistema autónomo de nivel 4 es su limitación a un determinado dominio de diseño operativo (ODD), lo que significa que únicamente podría operar bajo determinadas circunstancias o en determinados entornos. En cambio, el nivel 5, no tiene esta limitación, y el sistema autónomo puede operar en cualquier entorno sin verse limitado por las circunstancias de un ODD.

En el contexto de esta tesis doctoral, es importante obtener una visión completa de las capacidades que se esperan en la actualidad de los vehículos autónomos, por lo que se analizarán más en detalle los niveles 4 y, en especial, el 5. La misma guía de prácticas recomendadas por la SAE realiza una descripción más en detalle de estos niveles [123]. Este análisis se basa en los roles desempeñados tanto por el usuario como por el sistema autónomo durante la tarea dinámica de conducción.

Tabla 4. 2. Roles desempeñados por el usuario y por el sistema autónomo en el nivel 4 SAE de conducción autónoma.

Nivel 4 – Alta automatización de la conducción	
Rol del usuario	Rol del sistema autónomo
Sistema autónomo desactivado	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Verifica la disponibilidad operativa del vehículo equipado con el sistema autónomo. ✓ Determina si debe activar el sistema autónomo. ✓ Se convierte en pasajero cuando el sistema autónomo se activa sólo si está presente físicamente en el vehículo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite su activación únicamente dentro de su dominio de diseño operativo (ODD).
Sistema autónomo activado	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ No necesita realizar la DDT o el Fallback. ✓ No necesita determinar cuándo y cómo lograr una condición de riesgo mínimo. ✓ Puede realizar la recuperación del vehículo (Fallback) después de una solicitud de intervención. ✓ Puede solicitar que el sistema autónomo se desactive y puede lograr alcanzar una condición de riesgo mínimo una vez se ha desactivado. ✓ Puede convertirse en el conductor después de una desactivación del sistema solicitada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realiza la tarea dinámica de conducción (DDT) al completo. ✓ Puede emitir una solicitud oportuna para intervenir. ✓ Se encarga de realizar el Fallback y una transición a la condición de riesgo mínimo cuando: <ul style="list-style-type: none"> a) Ocurre un fallo relevante del sistema para el desempeño de la DDT. b) Un usuario no responde a una solicitud de intervención. c) Un usuario solicita que logre una condición de riesgo mínimo. ✓ Se desconecta, si es apropiado, sólo después de: <ul style="list-style-type: none"> a) Alcanzar una condición de riesgo mínimo. b) Un conductor está realizando la DDT. ✓ Puede retrasar la desconexión solicitada por el usuario.



Tabla 4. 3. Roles desempeñados por el usuario y por el sistema autónomo en el nivel 5 SAE de conducción autónoma.

Nivel 5 – Automatización completa de la conducción	
Rol del usuario	Rol del sistema autónomo
Sistema autónomo desactivado	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Verifica la disponibilidad operativa del vehículo equipado con el sistema autónomo. ✓ Determina si debe activar el sistema autónomo. ✓ Se convierte en pasajero cuando el sistema autónomo se activa, solo si está presente físicamente en el vehículo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite la activación del sistema autónomo en todas las condiciones de circulación en carretera en las que un conductor podría conducir.
Sistema autónomo activado	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ No necesita realizar la DDT o el Fallback. ✓ No necesita determinar cuándo y cómo lograr una condición de riesgo mínimo. ✓ Puede realizar la recuperación del vehículo (Fallback) después de una solicitud de intervención. ✓ Puede solicitar que el sistema autónomo se desactive y puede lograr alcanzar una condición de riesgo mínimo una vez se ha desactivado. ✓ Puede convertirse en el conductor después de una desactivación del sistema solicitada. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realiza la tarea dinámica de conducción (DDT) al completo. ✓ Se encarga de realizar el Fallback y una transición a la condición de riesgo mínimo cuando: <ul style="list-style-type: none"> a) Ocurre un fallo relevante del sistema para el desempeño de la DDT. b) Un usuario no responde a una solicitud de intervención. c) Un usuario solicita que logre una condición de riesgo mínimo. ✓ Se desconecta, si es apropiado, sólo después de: <ul style="list-style-type: none"> a) Alcanzar una condición de riesgo mínimo. b) Un conductor está realizando la DDT. ✓ Puede retrasar la desconexión solicitada por el usuario.

Las definiciones recogidas en las tablas anteriores reflejan nuevamente que la principal diferencia entre el nivel 4 y 5 está en el dominio de diseño operativo en el que pueden circular. En el nivel 5 de conducción autónoma, la no limitación de circulación a un ODD específico significa que el sistema autónomo puede operar el vehículo bajo todas las circunstancias de circulación en carretera en las que un conductor sería capaz de conducir dentro de su región del mundo. Esto implica, por ejemplo, que no existen restricciones de diseño climáticas, horarias, o geográficas sobre dónde o cuando el sistema autónomo puede operar el vehículo. Sin embargo, puede haber condiciones en las que un conductor no sería capaz de conducir, en las que el sistema autónomo tampoco podría completar un viaje determinado. Estas condiciones pueden ser, por ejemplo, tormentas de nieve, carreteras inundadas, presencia de placas de hielo, etc., y hasta que no desaparezcan el sistema autónomo no podría operar. En la circunstancia de encontrarse con estas condiciones durante la DDT, el sistema autónomo relocalizaría el Fallback para alcanzar una condición de riesgo mínimo, como puede ser detenerse a un lado de la carretera y esperar a que dichas condiciones cambien.



La concepción actual del vehículo autónomo es la de aquel equipado con un sistema inteligente que le permita operar de la misma forma que lo haría una persona. Este es el objetivo generalizado tanto en la industria como en la comunidad científica. La definición tanto de los niveles 4 y 5 plantea una serie de interrogantes o ambigüedades que deberán ser resueltas. En el nivel 4, las restricciones asociadas a un determinado ODD representan un abanico enorme de posibilidades respecto a las capacidades del sistema autónomo. En un escenario donde el dominio de diseño operativo sea muy acotado (por ejemplo, en condiciones diurnas, con tiempo favorable, buena visibilidad, sin tráfico en la carretera y en un determinado barrio de una ciudad, o incluso un campus universitario), las prestaciones o tecnología incorporada del sistema autónomo distarán mucho del objetivo final, y será considerado un vehículo de nivel 4. Este paso del nivel 4 al 5 representa un gran salto cualitativo en el desarrollo tecnológico de los sistemas autónomos.

El diseño del vehículo juega un papel fundamental en la carrera por la conducción autónoma. El vehículo que sea capaz de realizar la navegación autónoma por sus propios medios no necesitará ni volante ni pedales, ya que las personas estarán fuera de la ecuación de conducir. No obstante, las definiciones de la SAE no contemplan este hecho y recogen una posibilidad que genera dudas. Tanto en los niveles 4 como 5, en los que el usuario no necesitaría realizar ninguna acción, a la hora de la tarea dinámica de conducción, se incorpora la posibilidad de que el vehículo pueda ser operado por la persona o por el sistema, representando la opción de un cambio de modo manual-autónomo. Esta dualidad tiene sentido en una tecnología en desarrollo que todavía no ha alcanzado su máximo potencial. De acuerdo con el enfoque realizado en la definición de nivel 4, aunque no tendría razón de ser dentro del ODD, sí que resulta comprensible su presencia para que el vehículo pudiera circular en modo manual, bajo aquellas circunstancias no contempladas dentro de su ODD. En cambio, la propia definición del nivel 5 refleja la ausencia de sentido de esta dualidad en el modo de conducción, ya que el sistema autónomo habría alcanzado la capacidad de circular bajo cualquier circunstancia en cualquier entorno. Recordando que el objetivo principal de los vehículos autónomos es mejorar las capacidades de las personas en la tarea de conducir, para mejorar notablemente la seguridad y eficiencia vial, el autor de esta tesis considera que la definición actual del nivel 5, el vehículo completamente autónomo, es incompleta.

Otra de las cuestiones fundamentales son los sistemas de comunicaciones de los vehículos. A pesar de que en la descripción de los niveles de autonomía de la SAE no se hace una clara referencia a estos sistemas, en la descripción del término “Autónomo”, se recoge una importante aclaración. Se especifica que, si un sistema de conducción autónoma “depende de las comunicaciones o la cooperación con entidades externas, debería considerarse cooperativo en lugar de autónomo”. Nuevamente, el autor de esta tesis está en desacuerdo con este concepto, ya que los vehículos autónomos y cooperativos no deberían ser conceptos excluyentes en ningún caso. En el escenario de la automatización del tráfico todo vehículo autónomo ha de ser necesariamente cooperativo.

4.1.2. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos aéreos

La aviación no tripulada presenta notables diferencias con el sector de la conducción autónoma. La antigüedad de las aeronaves no tripuladas, tal y como se expuso en el



apartado 2.2, es considerablemente mayor a la de los vehículos autónomos terrestres. Otra diferencia importante han sido sus usos y aplicaciones, donde las aeronaves no tripuladas han sido desarrolladas originalmente para aplicaciones militares, habiendo formado parte de las principales fuerzas aéreas del mundo durante las últimas décadas. Desde un punto de vista regulatorio o normativo, el enfoque civil o militar de las aplicaciones de estos vehículos tiene un papel muy relevante.

La variedad de aeronaves no tripuladas existente es muy superior también a la de vehículos autónomos terrestres. Las características y prestaciones de este tipo de aeronaves pueden ser muy dispares, variando desde aeronaves de unos pocos gramos y reducida autonomía hasta aeronaves de varias toneladas y gran autonomía de vuelo. Las prestaciones de estas aeronaves están asociadas a los certificados de aeronavegabilidad, que certifica que la aeronave está en condiciones de aeronavegabilidad conforme al diseño del tipo de aeronave, y son emitidos por la autoridad de aviación civil del Estado en el que esté matriculada dicha aeronave. A pesar de que no existe un estándar universal en relación con la clasificación de estas aeronaves, los criterios empleados por las diferentes organizaciones y agencias internacionales de aviación (descritas en el apartado 2.3.2) son muy similares.

En aviación, al hablar de “autonomía”, es importante hacer una aclaración, debido al doble significado que puede tener esta palabra:

- a) Autonomía de Vuelo: Es la capacidad que tiene una aeronave para estar operando sin necesidad de repostar. Es una unidad temporal expresada habitualmente en horas. Es el concepto al que tradicionalmente se refiere la palabra “autonomía” en aviación.
- b) Autonomía del Sistema. Es la capacidad que tiene una aeronave para realizar una operación por sus propios medios, sin la intervención de un piloto. A lo largo de esta tesis, nos referiremos a este concepto al hablar de “aeronave autónoma”.

Se elabora una primera clasificación de los UAS en base a los tipos de plataforma aérea y sus características. Se ha tomado como referencia el artículo científico de Adam C. Watt en el que se realiza una amplia clasificación y análisis de las consideraciones de uso de los UAS [124].

- MAV (*Micro Air Vehicle*) o NAV (*Nano Air Vehicle*): Reciben este nombre debido a su reducido tamaño. Son típicamente utilizados en aplicaciones militares en las que los soldados los pueden trasladar de manera individual.
- LASE (*Low Altitude, Short-Endurance*): Son sistemas también conocidos como sUAS (*Small Unmanned Aircraft Systems*). Se refieren a aeronaves de pequeño tamaño, obviando la necesidad de pistas de aterrizaje ya que han sido diseñadas para su fácil despliegue y recuperación.
- LASE Close: Es una categoría similar a la anterior, con la diferencia de que las aeronaves sí requieren una pista de aterrizaje. Siguen siendo aeronaves de pequeño tamaño, pero de peso y tamaño superior a la anterior categoría.
- LALE (*Low Altitude, Long Endurance*): Por lo general, representan el extremo superior de los considerados sUAS. Pueden transportar cargas de pago de varios kg a altitudes de unos pocos miles de metros durante periodos prolongados.



- MALE (*Medium Altitude, Long Endurance*): Son aeronaves de mucho mayor tamaño que aquellas de baja altitud, operando a elevadas altitudes en vuelos con alcances de cientos de km respecto a las bases, con grandes autonomías.
- HALE (*High Altitude, Long Endurance*): Son las aeronaves no tripuladas de mayor tamaño, en muchos casos son más grandes que las aeronaves tripuladas de la aviación general. Vuelan a altitudes muy elevadas en misiones con un alcance de miles de km. Su autonomía puede superar un día de duración.
- VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*): Son aeronaves que no requieren una pista de aterrizaje. Tienen la capacidad para despegar y aterrizar en vertical, realizar vuelo estacionario, y realizar el crucero en modo ala fija. Sus altitudes de vuelo y autonomías son muy variantes en función de sus objetivos de diseño.

Tabla 4. 4. Características operativas de los diferentes tipos de UAVs.

Tipo	Altitud Vuelo	Autonomía de Vuelo
MAV	<300 m	5-30 min
LASE	<1.500 m	1-2 h
LASE Close	<1.500 m	> 2h
LALE	~1.500 m	> 2h
MALE	5.000-9.000 m	~24 h
HALE	> 20.000 m	>24 h
VTOL	-	-

Esta clasificación se realiza en función de las características de diseño de las aeronaves no tripuladas, pero no hace ninguna referencia a la autonomía del sistema. En el año 2002 el Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos presentó un artículo titulado “Metrics Schmetrics” que exponía los resultados de un estudio sobre cómo determinar el nivel de autonomía de un vehículo aéreo no tripulado [125]. El autor del artículo evidenció la necesidad de evaluar y clasificar de manera eficaz los algoritmos autónomos, dada la escasez de métricas y/o taxonomías existentes en aquel momento. Su trabajo aportaba un marco, denominado AFRL Autonomy Framework, que identificaba 10 niveles de autonomía y proporcionaba las características propias de cada uno de ellos.

Este marco fue tomado como referencia dentro de la comunidad científica para evaluar el nivel de autonomía de las diferentes aeronaves no tripuladas, y ha estado vigente durante estas dos décadas. La tabla 4.5 es una traducción de las definiciones originales recogidas en el citado artículo.

La clasificación comienza en un nivel previo, denominado nivel 0, en el que el piloto remoto tiene el control completo sobre la operación de la aeronave, que únicamente está equipada con la tecnología que permite transmitir a este piloto remoto la información necesaria para que pueda desempeñar su actividad. La clasificación continúa con el nivel 1, en el que se le proporcionan datos sobre la misión que debe realizar la aeronave, otorgándole así los primeros grados de autonomía, y terminando en el nivel 10, en el que la aeronave es completamente autónoma a lo largo de toda su operación.

Tabla 4. 5. Niveles de autonomía de las aeronaves no tripuladas según el AFRL Autonomy Framework.

Nivel	Descripción	Observación	Orientación	Decisión	Actuación
		Percepción / Situación de Conciencia	Análisis / Coordinación	Toma de Decisiones	Capacidad
10	Completamente Autónomo	Conocedor de todo dentro del Espacio de batalla.	Coordina según sea necesario.	Capaz de total independencia.	Requiere poca orientación para hacer su trabajo.
9	Aprendizaje en Enjambre del Espacio de Batalla	Inferencia del espacio de batalla: intención de uno mismo y de los demás (aliados y enemigos). Entorno complejo/intenso: seguimiento a bordo.	Objetivos estratégicos de grupo asignados. Tácticas enemigas inferidas.	Planificación grupal táctica distribuida. Determinación individual del objetivo táctico. Planificación y ejecución de tareas individuales. Elección de objetivos tácticos.	Logro grupal del objetivo estratégico sin asistencia de supervisión.
8	Aprendizaje del Espacio de Batalla	Interferencia de proximidad: intención de uno mismo y de los demás (aliados y enemigos). Dependencia reducida de datos externos.	Objetivos estratégicos de grupo asignados. Tácticas enemigas inferidas. ATR.	Planificación grupal táctica coordinada. Planificación y ejecución de tareas individuales. Elección de objetivos de oportunidad.	Logro grupal del objetivo estratégico con mínima asistencia de supervisión (ej.: ir a cazar SCUD).
7	Conocimiento del Espacio de Batalla	Conciencia de seguimiento corta: historial y predicción de datos del espacio de batalla limitados en rango, marco temporal y cantidad. Interferencia limitada complementada con datos externos.	Objetivos tácticos grupales asignados. Trayectoria del enemigo estimada.	Planificación y ejecución de tareas individuales para alcanzar objetivos.	Logro grupal del objetivo táctico con la mínima asistencia de supervisión.
6	Cooperación en Tiempo Real Multi-Vehículo	Conciencia ampliada: detección a bordo de largo alcance, complementada con datos externos.	Objetivos tácticos grupales asignados. Ubicación del enemigo detectada/estimada.	Planificación y ejecución coordinada de la trayectoria para cumplir los objetivos: optimización del grupo.	Logro grupal del objetivo táctico con la mínima asistencia de supervisión. Posible separación cercana en el espacio aéreo (1-100 yardas).
5	Coordinación en Tiempo Real Multi-Vehículo	Detección de conciencia: sensores locales para detectar a otros, fusionados con datos externos.	Plan de grupo táctico asignado. Diagnóstico RT de salud; capacidad para compensar la mayoría de fallos y condiciones de vuelo; capacidad para predecir la aparición de fallos (ej.: pronósticos de salud). Diagnóstico grupal y gestión de recursos.	Replanificación de trayectoria a bordo: optimiza las condiciones actuales y predictivas. Evita colisiones.	Realización grupal del plan táctico asignado externamente. Evita colisiones aéreas. Posible separación en el espacio aéreo cercana (1-100 yardas), formación en condiciones sin amenaza.
4	Vehículo adaptable a Fallos/Eventos	Conciencia deliberada: los aliados comunican datos.	Plan táctico asignado. Reglas de compromiso asignadas. Diagnóstico RT de salud; capacidad para compensar la mayoría de fallos y condiciones de vuelo. Cambios en circuito interno reflejados en rendimiento del circuito externo.	Replanificación de trayectoria a bordo: impulsada por eventos. Autogestión de recursos. Desconflicto.	Auto cumplimiento del plan táctico asignado externamente. Separación media de vehículos en el espacio aéreo (cientos de yardas).
3	Respuesta Robusta en Tiempo Real a Fallos/Eventos	Historial y modelos de salud/estado.	Plan táctico asignado. Diagnóstico RT de salud (¿Cuál es el alcance de los problemas?). Capacidad para compensar la mayoría de fallos de control y condiciones de vuelo (control adaptativo de bucle interno).	Evalúa el estado frente a las capacidades de misión requeridas. Aborta/RTB si es insuficiente.	Auto cumplimiento del plan táctico asignado externamente.
2	Misión Cambiable	Sensores de salud/estado.	Diagnóstico RT de salud (¿Tengo problemas?) Replanificación externa (según sea necesario)	Ejecuta planes pre-programados o cargados en respuesta a las condiciones de la misión o de salud.	Auto cumplimiento del plan táctico asignado externamente.
1	Ejecución de Misión Pre-planificada	Datos de misión pre-cargados. Detección del control de vuelo y navegación.	Análisis BIT Pre/Post vuelo. Reporte del estado.	Misión y plan de aborto pre-programados.	Amplios requisitos de separación en el espacio aéreo (millas).
0	Vehículo Remotamente Pilotado	Detección del control de vuelo (altitud, tasas). Cámara frontal.	Datos de telemetría. Comandos del piloto remoto.	Ninguna.	Controlado por el piloto remoto.



Hay que destacar el contexto militar en el que se desarrollaron este tipo de aeronaves, motivo por el cual se utiliza nomenclatura de carácter bélico en la definición de estos niveles de autonomía. Recordemos que hace dos décadas, la práctica totalidad de las aplicaciones y usos de las aeronaves no tripuladas eran militares. No obstante, estos conceptos son aplicables a contextos de operaciones civiles. El espacio de batalla hace referencia al entorno en el que se realiza la operación. Los aliados son aeronaves con las que coopera o se coordina a lo largo de la misión. En el contexto civil, a priori, no existiría la presencia de enemigos, cuyo objetivo sería derribar la aeronave, lo cual facilita en gran medida su desarrollo. La identificación de enemigos, predicción de trayectoria e identificación de estos, son capacidades que en el sector civil se aplican a objetos o vehículos externos con los que no se tiene una coordinación directa.

En el contexto de esta tesis doctoral, tiene especial interés analizar en detalle los niveles con mayor grado de autonomía de las aeronaves. Una aeronave con nivel 5 ya tendría unas capacidades autónomas muy destacables. Estaría equipada con la tecnología que le permitiera detectar otras aeronaves en su entorno, pudiendo completar dicha información con datos proporcionados por terceros. Tendría la capacidad de hacer un diagnóstico de su propio estado y la capacidad de compensar fallos de vuelo y condiciones cambiantes. Además, estaría dotada de tecnología que le permitiera hacer análisis predictivos con los que adelantarse a eventos conflictivos. Contaría a su vez con la capacidad de replanificar las trayectorias, optimizando las condiciones de vuelo y tendría la tecnología que le permitiera evitar colisiones. Una de las características más significativas de este nivel, es la capacidad que tendría la aeronave para coordinarse en tiempo real con otros vehículos, pudiendo navegar de manera muy cercana a otras aeronaves en el espacio aéreo.

El nivel 9 de autonomía se caracteriza por aeronaves con capacidades autónomas de muy alto nivel. Las aeronaves pueden aprender del entorno de navegación, siendo conscientes de su misión y objetivos dentro del mismo, así como de las intenciones de otros vehículos u objetos que se encuentren en el mismo espacio de navegación. Son capaces de realizar seguimientos continuados de entornos complejos. A su vez pueden identificar patrones de conducta de otros objetos o vehículos, analizar cómo le afectarían dichos patrones, y actuar en consecuencia. La aeronave será capaz de realizar la misión para la que ha sido diseñada de manera completamente autónoma. Tendrá la posibilidad de realizar misiones de manera conjunta con otras aeronaves si fuese necesario, sin ningún tipo de asistencia de supervisión.

Por último, una aeronave de nivel 10 se puede considerar completamente autónoma. Será perfectamente consciente de todo dentro del espacio de navegación. Tendrá plena situación de conciencia propia y del entorno a lo largo de la navegación en toda su misión. Realizará los análisis internos que son necesarios, así como del entorno al completo. Tendrá total independencia en la toma de decisiones y en su actuación.

En una primera comparación de los niveles de autonomía de las aeronaves no tripuladas con los niveles de autonomía de los vehículos autónomos terrestres, se pueden observar una serie de similitudes y diferencias notables.

El objetivo común de ambos es obtener la tecnología que permita a los diferentes vehículos realizar la navegación por sus propios medios, eliminando la presencia de un conductor o piloto. En ambos casos se define una escala en la que progresivamente se va dotando al



vehículo de inteligencia, para realizar diferentes partes de su misión sin la intervención humana.

Sin embargo, se detectan una serie de diferencias considerables. La definición de los niveles de autonomía de las aeronaves no tripuladas, no exclusivamente por ser superiores en cantidad, aportan un planteamiento más completo del problema de la automatización. El primer punto clave es el entorno de navegación, en el caso terrestre denominado ODD (dominio de diseño operativo) y en el caso aéreo espacio de batalla o espacio de navegación. Los enfoques que se han empleado en las definiciones son diferentes, pero el trasfondo de la cuestión es el mismo: la necesidad que tiene el vehículo de conocer con precisión el entorno por el que va a realizar la navegación y las condiciones estáticas y dinámicas de este. En el caso de las aeronaves, desde el nivel 4 de autonomía se tiene un especial interés por esta cuestión.

La coordinación y cooperación con otros vehículos es otro punto de importancia en el que se presentan notables diferencias. Las aeronaves de nivel 4 están preparadas para recibir datos del entorno de navegación de otros vehículos o la propia estación de control. De hecho, el planteamiento de los niveles intermedios de autonomía (especialmente del nivel 4 al 8) está sustentado en la ayuda de terceros actores a la aeronave, a la hora de reconocer el entorno de navegación. Pero este planteamiento cooperativo también incluye la colaboración directa con otras aeronaves en la realización de misiones. Es una perspectiva que incluye la necesidad de esta coordinación como parte esencial de la autonomía completa. Recordemos que en el caso de los niveles de conducción autónoma esta cooperación o coordinación con otros vehículos no se contempla, recomendando a tal efecto la consideración de vehículos conectados en vez de autónomos.

Los orígenes de las aeronaves no tripuladas dan lugar a otra sustancial diferencia de planteamiento. Uno de los principales motivos por los que se trabajó en el desarrollo de aeronaves no tripuladas era para poder operar en zonas de conflicto sin poner en riesgo a los pilotos de las aeronaves. Por ese motivo se comenzó a trabajar en el diseño de aeronaves pilotadas remotamente, a las que se les ha ido añadiendo importantes grados de autonomía. En las operaciones militares, el número de aeronaves empleadas en una determinada misión no es muy elevado, en comparación con un escenario de transporte. Razón por la cual se puede asumir la necesidad de un piloto (o varios) remoto por cada aeronave. La existencia de este piloto remoto obliga a la creación de una estación de control desde donde se pilote la aeronave. Es la forma de gestión básica de este tráfico no tripulado. Al igual que ocurre en la aviación convencional, la gestión del tráfico juega un papel fundamental. En cambio, el planteamiento de la conducción autónoma se hizo desde sus orígenes para reemplazar a los conductores. Esto significa que el objetivo consistía en desarrollar sistemas autónomos para un número muy elevado de vehículos, tarea para la cual no tiene sentido plantear el diseño de operadores o conductores remotos para cada vehículo (exceptuando las fases de desarrollo). Este motivo explica el enfoque hacia un vehículo autónomo completamente independiente. Volviendo al sector aéreo, el planteamiento más reciente de aplicaciones civiles de estas aeronaves autónomas, como puede ser el transporte de mercancías en una ciudad o región, donde de manera simultánea estén volando cientos o miles de aeronaves, pone en cuestión el planteamiento de tener un operador por aeronave. Se plantea la misma circunstancia que en la conducción autónoma terrestre.



Esta última cuestión es el trasfondo final de lo que ha de ser el vehículo o aeronave autónoma. En el momento en el que se elaboraron ambos marcos con las definiciones de los niveles de autonomía existían muchas dudas sobre cómo serían los sistemas completamente autónomos. Ninguno de los dos marcos especifica claramente la eliminación completa del conductor o piloto remoto, se mantiene la posibilidad de que pudiese intervenir en situaciones muy puntuales. La eliminación completa de esta persona se puede conseguir en el momento que se incorpore la gestión automatizada del tráfico, que, en ambos casos, jugará un papel crítico para poder alcanzar la automatización del tráfico.

4.1.3. Capacidades y prestaciones de los vehículos autónomos marinos

El desarrollo tecnológico de las embarcaciones autónomas ha sido muy importante en los últimos años, sin embargo, desde una perspectiva industrial en comparación con los sectores aéreos o terrestres, el sector marítimo de los sistemas autónomos no está tan avanzado. Hasta la fecha no se ha establecido una clasificación de los niveles de autonomía de los sistemas autónomos marinos, como ocurre en la conducción autónoma o la navegación aérea autónoma.

En la comunidad científica se utiliza como referencia las áreas de control y autonomía de los sistemas no tripulados en general. En la siguiente tabla se exponen los cuatro niveles de autonomía mayormente empleados en la clasificación de los sistemas marinos no tripulados, teniendo en cuenta la interacción entre el operador humano y los movimientos de la máquina [126].

Tabla 4. 6. Descripción de los diferentes niveles de autonomía de los sistemas marinos no tripulados.

Nivel	Nombre	Descripción
1	Operado por humanos	El operador humano toma todas las decisiones para un sistema no tripulado. El sistema no tripulado carece de control autónomo de la situación de su entorno, aunque puede tener respuestas de información a los datos detectados.
2	Delegado humano	El vehículo no tripulado tiene la capacidad de realizar muchas funciones independientemente del control humano cuando se le delega para hacerlo. Este nivel abarca controles automáticos, controles de motor y otras automatizaciones de bajo nivel, que deben ser activadas o desactivadas por la intervención humana y deben actuar en mutua exclusión de la operación humana.
3	Supervisado por humanos	El vehículo no tripulado puede realizar una gran variedad de actividades cuando el humano le otorga permisos de alto nivel o dirección. Tanto el humano como el sistema pueden iniciar comportamientos basados en datos detectados, pero el sistema puede hacerlo solo si está dentro del alcance de sus tareas dirigidas en ese momento.
4	Completamente autónomo	El vehículo no tripulado recibe los objetivos de los humanos y los traduce en tareas que debe realizar sin ningún tipo de intervención humana. Un operador humano aún podría ingresar en el circuito en una emergencia o cambiar los objetivos, aunque en la práctica puede haber demoras de tiempo significativas antes de que ocurra la intervención humana.



El primer nivel hace referencia a bajas capacidades de autonomía, siendo embarcaciones que pueden realizar varias tareas donde su autonomía es muy limitada, como pueden ser tareas de seguridad marítima, tareas de apoyo, operaciones de interdicción, etc.

El segundo es un nivel moderado de autonomía, que ofrece significativas ventajas en las capacidades de las embarcaciones no tripuladas, satisfaciendo la mayoría de las tareas requeridas. Muchas de estas aplicaciones tienen carácter militar, como puede ser la guerra de superficie, la protección del pasaje frente a submarinos o la guerra electrónica entre otras. Las tecnologías clave y sus algoritmos se pueden implementar para la verificación y mejora continuas y estables.

El nivel 3 implica una alta autonomía del sistema, donde las tecnologías y algoritmos clave han sido completamente validados. Las áreas de aplicación de estas embarcaciones comprenden misiones complejas, que necesitan altos requisitos de autonomía.

Por último, el nivel 4 representa la autonomía avanzada o total, donde la capacidad de la embarcación autónoma satisface los requisitos de las tareas más avanzadas.

Al mismo tiempo que se avance en el área legislativa de este tipo de embarcaciones, previsiblemente se avanzará en el desarrollo de clasificaciones específicas y detalladas de las capacidades de las embarcaciones autónomas. De igual manera que ocurre en los sectores aéreo y terrestre, existe la necesidad de elaborar un marco estandarizado que evalúe las características de los sistemas autónomos marinos.

4.2. Automatización del vehículo vs Automatización del tráfico

El análisis de las capacidades y prestaciones de los sistemas autónomos definidos en los diferentes marcos o estándares de referencia muestra la existencia de una serie de similitudes entre sí. La carrera por conseguir el vehículo autónomo, ya sea terrestre, aéreo o marítimo, está sustentada en dos conceptos fundamentales recogidos en los diferentes estándares, en algunos casos de manera más subliminal.

El primer concepto en el que se basa la automatización de cualquier vehículo, y que se ha utilizado como punto de partida en los diferentes desarrollos tecnológicos, es “imitar el comportamiento de los humanos”. El planteamiento inicial ha sido el desarrollar un sistema inteligente que fuese capaz de ejecutar la tarea de navegación de un vehículo de la misma manera que lo realizaría una persona, es decir, imitando el comportamiento humano. En el caso terrestre, se selecciona el comportamiento del conductor perfecto, aquel que siempre cumpliría con todas las regulaciones y recomendaciones de tráfico existentes. El sistema autónomo controla el movimiento del vehículo siguiendo el modelo de actuación del conductor, manteniendo la distancia de seguridad con el vehículo delantero, parando ante una señal de stop o un semáforo, y cumpliendo el resto de los requisitos legislativos. De manera análoga, con sus respectivas particularidades, ocurre lo mismo en el aire y en el mar.

El segundo concepto que marca el comportamiento de los sistemas autónomos es el conocido como “yo primero”. Los sistemas están desarrollados para buscar la mejor actuación para cada vehículo, tomando las decisiones que más le convengan en cada momento. Esto se aplica tanto desde el punto de vista de la seguridad como desde el punto



de vista de la eficiencia. El vehículo se comportará de forma que priorice su seguridad, así como la de su pasaje, actuando de tal forma que no se comprometa esta seguridad en ningún momento. En cuanto a la ruta, actuará de manera que seleccione en todo momento aquella que sea más apropiada para sus intereses, normalmente asociados a la ruta más corta o más rápida.

En el planteamiento inicial del diseño de un sistema que permita la automatización del tráfico, estos dos conceptos no pueden estar presentes. Se toman como punto de partida dos conceptos completamente opuestos.

Por un lado, está la “generación de nuevas reglas de tráfico”. Estas nuevas reglas de tráfico estarán orientadas a las capacidades que ofrecen los sistemas autónomos. La actual regulación de tráfico está orientada a las capacidades de las personas, y mantenerla supondría no explotar la potencialidad real de los sistemas autónomos. A pesar de que las personas tenemos altas capacidades para la realización de tareas complejas, como es el caso de la conducción, los sistemas autónomos tienen capacidades muy superiores, sobre todo en lo que se refiere a capacidad de procesamiento y memoria, velocidad de reacción o cantidad de datos recolectados por segundo. Un sistema autónomo es una máquina hiperespecializada, muy eficiente en la ejecución de sus tareas. Además, ni se cansa ni tiene preocupaciones.

Por otro lado, está el concepto de que “el interés general prevalece sobre el interés particular”. Es un argumento comúnmente empleado en el ámbito político a la hora de generar leyes en una determinada sociedad. La automatización del tráfico tiene el objetivo de optimizar la eficiencia del conjunto de vehículos, tarea para la cual es necesaria una gestión común de las rutas de cada vehículo. Si cada vehículo calculase su ruta en función a sus propios intereses se ocasionarían situaciones como las actuales, de colapso y congestión de las diferentes vías y arterias de circulación. En la actualidad, la gran mayoría de sistemas de conducción autónoma están diseñados como entidades independientes, que toman las decisiones de acuerdo exclusivamente a sus propios objetivos. Es una propuesta que se podría considerar como dispositivos “caja negra”. En la automatización del tráfico, esta aproximación no es válida. Los sistemas autónomos tendrán que ceder determinadas competencias a las entidades de gestión de tráfico, en busca de alcanzar el interés general.

El enfoque de los diferentes marcos de las capacidades de los sistemas autónomos permite obtener otra conclusión relacionada con el contexto de desarrollo de las diferentes tecnologías. Los niveles de autonomía del sector terrestre tienen un claro enfoque a la incorporación progresiva de vehículos con capacidades autónomas a la circulación convencional en situaciones de convivencia con el tráfico convencional. En cambio, tanto en el sector aéreo como en el marítimo, la definición de los niveles de autonomía tiene una clara orientación a misiones concretas, en las que el vehículo equipado con un sistema autónomo realiza una operación con unos objetivos determinados. A pesar del marcado enfoque de los niveles de conducción autónoma a la convivencia de estos con tráfico, en contraposición al enfoque orientado a misiones que tienen los niveles de autonomía de las aeronaves no tripuladas, son estos últimos los que contemplan mayor nivel de interacción con otros vehículos.

El máximo nivel de autonomía contemplado en los estándares actuales, bien sean terrestres, aéreos o marinos, es un requisito indispensable para lograr la automatización del

tráfico, pero no es suficiente. Se necesitan una serie de requisitos técnicos a mayores de los contemplados en la actualidad, en los diferentes marcos de referencia para la autonomía de los sistemas.

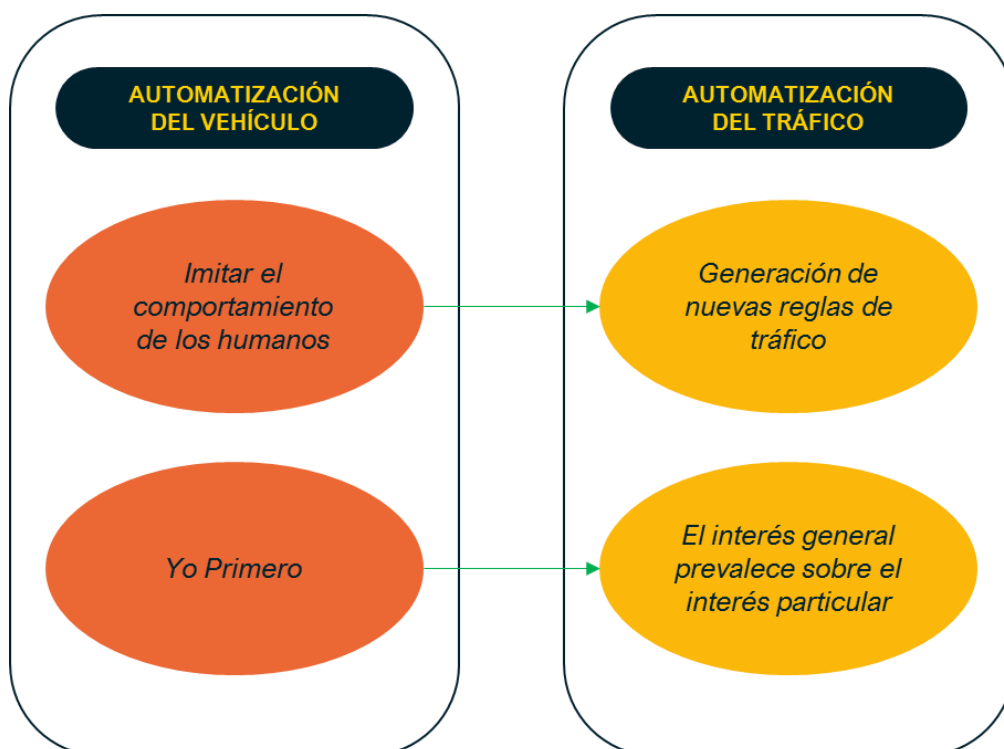


Figura 4. 1. Comparación de los paradigmas de la automatización del vehículo y la automatización del tráfico.

Estos requisitos definirán el siguiente nivel, la automatización del tráfico. Se podría generar el siguiente nivel en los diferentes marcos, el nivel 6 en el caso de la conducción autónoma terrestre, el nivel 11 en el caso de las aeronaves autónomas, o el correspondiente en el estándar que se cree para las embarcaciones autónomas. No obstante, el añadir un nivel extra en estos marcos podría no ser la opción apropiada. Hay que tener en cuenta que estos marcos están orientados a la automatización de los diferentes vehículos, no a la automatización del tráfico. Lo lógico sería generar un nuevo marco específico que recoja los requisitos de autonomía necesarios para automatizar el tráfico. Este nuevo marco de referencia tendría como punto de partida el máximo nivel de autonomía de los actuales estándares que definen la autonomía de los diferentes sistemas.



5. DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE AUTOMATIZADO

Establecidas las hipótesis de partida de la tesis doctoral, conociendo la problemática actual del transporte y la evolución del sector, explicado el planteamiento teórico de la tesis y habiendo analizado las diferencias entre la automatización de un vehículo y la automatización del tráfico, se puede abordar el diseño conceptual de un sistema de transporte automatizado.

Conceptualizar los fundamentos y partes principales es el primer paso en cualquier proceso de diseño. Un aspecto primordial en la fase de diseño conceptual es identificar muy bien la misión u objetivos que ha de desempeñar el sistema. La misión principal de este trabajo es conseguir la automatización del conjunto del tráfico a nivel nacional.

Automatizar el tráfico de un país representa un reto ingenieril sin precedentes, que supondrá una de las mayores revoluciones de la historia. Es una tarea tremendamente multidisciplinar que necesita de la integración y combinación de una gran cantidad de áreas de conocimiento. Esta tesis doctoral aborda el primer paso del reto, proponiendo un modelo de transporte automatizado que sirva como referencia para el resto de los desarrollos futuros necesarios para su materialización.

Este modelo de sistema de transporte automatizado se diseña en base a unas premisas u objetivos cuyas características son las siguientes:

- Automatización del tráfico. El sistema se diseña para automatizar el conjunto de ingenios que naveguen en una determinada región.
- Intermodalidad. Debe incluir la gestión de ingenios de los tres medios de transporte, terrestre, aéreo y marino. La arquitectura del sistema ha de integrar procesos comunes para la gran variedad de ingenios que existen. El mismo sistema ha de gestionar la automatización de todo el tráfico rodado terrestre, la aviación en cielos de baja cota, y la navegación de cabotaje. El sistema no incluye la aviación convencional ni las operaciones de navegación marítima internacionales.
- Ámbito nacional. El diseño se plantea para satisfacer la automatización del tráfico a nivel de un país, en este caso España. Incluye el conjunto de infraestructuras de transporte del país al completo, dentro de los sectores descritos en el punto anterior. Se plantea como un modelo replicable en otros países y regiones.
- Robustez. Un sistema que gestiona el transporte de un país ha de proporcionar la garantía de que pueda operar de forma constante. El transporte no puede detenerse por una avería del sistema o un ataque. El sistema debe diseñarse para proporcionar la robustez necesaria que ofrezca las alternativas pertinentes en caso de imprevistos.
- Seguridad. Es imprescindible garantizar la seguridad en todas sus variantes de manera constante. Es un sistema que desplaza ingenios que transportan personas o mercancías, que ha de garantizar su integridad. De la misma forma, estos ingenios han de garantizar la integridad de los elementos o personas presentes en sus entornos operativos.

- Estandarización. La generación de estándares y normas comunes es un aspecto crítico para permitir la integración de soluciones procedentes de diferentes actores de la industria y la investigación.

El diseño del sistema automatizado de transporte que permita satisfacer las características anteriores debe tener una infraestructura compuesta por tres elementos principales:

1. Gestión Automatizada del Tráfico. La automatización de miles o millones de ingenios autónomos requiere un proceso de gestión del tráfico, novedoso respecto a las técnicas convencionales, que será automático. Esta infraestructura de gestión del tráfico se denominarán Centros de Control de Tráfico (CCT), que tendrá una configuración distribuida.
2. Ingenios. Los ingenios son los elementos del sistema que ejecutan el fin último del transporte, bien sea de personas o mercancías. Estos ingenios son autónomos, tienen la capacidad de desplazarse por sí mismos, desde un origen hasta un destino, sin ningún tipo de intervención humana. Además, incorporan una arquitectura de procesos que les permite actuar de manera colaborativa con el resto de los elementos del sistema.
3. Red de Comunicaciones. La implementación de la gestión automatizada del tráfico implica que los Centros de Control de Tráfico se comuniquen con los ingenios. La infraestructura que posibilita estas comunicaciones se denomina Red S3 (seguridad al cubo). Su principal función es garantizar las comunicaciones en todo momento y hacerlo con los máximos niveles de seguridad. Se diseña como una nueva red de comunicaciones dedicada exclusivamente para el transporte.

La combinación de la Red S3 con la gestión de los Centros de Control de Tráfico genera el Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu), que está formado por aquellas regiones del espacio (aéreo, terrestre y marino) en las que se genera un entorno radioeléctrico que posibilita la navegación de los ingenios con los criterios de robustez, operatividad y seguridad necesarios. En la Figura 5. 1 se representa de manera conceptual los elementos principales del sistema de transporte automatizado.



Figura 5. 1. Representación conceptual del sistema automatizado de transporte.



5.1. Gestión automatizada del tráfico

La gestión del tráfico tradicionalmente se ha considerado una rama de la logística cuya finalidad es la planificación, control y despacho de los servicios de transporte, necesarios para mover físicamente vehículos (terrestres, aéreos o marinos) y mercancías.

En la Nueva Era del Transporte, que está caracterizada por la navegación de ingenios autónomos, la gestión del tráfico se enfrenta de igual modo al proceso de automatización, con el objetivo de poder satisfacer las demandas y exigencias de estos ingenios, así como poder ofrecer las prestaciones que se espera de un sistema de transporte seguro y eficiente.

En este apartado se analiza la gestión del tráfico convencional, la evolución necesaria que ha de tener, y se presenta el diseño conceptual de los Centros de Control de Tráfico, encargados de la gestión automatizada del tráfico.

5.1.1. La gestión del tráfico en la actualidad

La gestión del tráfico es una disciplina con muchos años de antigüedad, pero ha tenido y tiene concepciones y características muy diferentes, dependiendo del modo de transporte en el que se implemente. En este apartado analizaremos cómo se implementa la gestión del tráfico en los contextos terrestre, aéreo y marino, para obtener un análisis de sus principales diferencias y similitudes.

Es importante este análisis para comprender el salto cualitativo que representa la gestión automatizada del tráfico respecto a cualquiera de las modalidades que se han desarrollado e implementado hasta la fecha.

5.1.1.1. Gestión del tráfico rodado

La población mundial se ha ido trasladando a grandes urbanizaciones en los últimos siglos. El crecimiento de estas ciudades, y la aparición de los automóviles, generaron la necesidad de establecer unas reglas que permitiesen controlar el tráfico.

El tráfico rodado se rige por un código de circulación establecido por cada país, siendo la inmensa mayoría muy similares entre sí. Entre las diferentes situaciones que ocurren, las más problemáticas son las intersecciones, donde el sistema de prioridades es fundamental. Estas intersecciones están controladas por diferentes señales (stop, ceda el paso, etc.) o semáforos, que determinan qué vehículos tienen prioridad en cada circunstancia. Se podría definir como una gestión del tráfico por lotes.

Una de las principales actuaciones del control del tráfico, estrechamente relacionada con los sistemas ITS, descritos en el apartado 2.2.5, es la gestión de estas intersecciones mediante la implementación de sistemas retroalimentados. Se emplean sistemas sensoriales de medición del tráfico, algoritmos que procesan y estiman el estado del tráfico y se actúa sobre los semáforos o señales informativas a los conductores, que les proporcionan información sobre la congestión.



Los principales objetivos de la gestión del tráfico rodado en la actualidad son:

1. Mejorar la movilidad mediante la reducción de la congestión.
2. Mejorar el medio ambiente a través del ahorro de combustible y la reducción en las emisiones.
3. Mejorar la seguridad reduciendo los errores humanos al conducir.
4. Mejorar el estacionamiento reduciendo el número de vehículos inactivos.

El problema más relevante que busca solventar la gestión del tráfico es la congestión. En primer lugar, hay que comprender el problema y saber cuáles son sus causas. Existen dos motivos principales, el exceso de demanda y una gestión del tráfico ineficiente. La congestión se produce en el momento que la demanda, es decir, el número de vehículos que están utilizando una determinada vía es superior a la capacidad de dicha vía. Una planificación o diseño deficiente del tráfico en una determinada zona puede acrecentar dicha saturación.

Los principales sistemas de control del tráfico empleados en la actualidad se pueden agrupar y describir en función de sus características [127], de la siguiente manera:

- Medición del tráfico. Son sistemas basados en sensores de medición que permiten obtener información del tráfico. Estos sistemas pueden utilizar tecnologías como cámaras, radas, sensores inalámbricos o GPS entre otras, para identificar tanto vehículos como pasajeros.
- Estimación del estado del tráfico. Se emplean algoritmos de control retroalimentados que permiten estimar el estado del tráfico y obtener una configuración de los parámetros que deben tener las señales. Se utilizan modelos dinámicos de los flujos de tráfico.
- Actuación en señales. En función de los resultados obtenidos por los diferentes algoritmos empleados en el análisis y estimación del tráfico, se puede actuar en la configuración de semáforos (variación en tiempos) o en señales dinámicas que son modificables, principalmente en autopistas, sobre las que se puede modificar la velocidad máxima
- Control avanzado. Se considera dentro de esta categoría las técnicas más avanzadas, como ATDM e ICM. La gestión del transporte activo y demanda, ATDM (*Active Transportation and Demand Management*), proporciona importantes mejoras en los flujos de tráfico como resultado de la monitorización y aplicación proactiva del control del tráfico y esquemas de precios. La gestión de corredores integrados, ICM (*Integrated Corridor Management*), busca mayores ganancias interconectando diferentes subsistemas de transporte.

A pesar de los considerables avances realizados en todas estas técnicas y tecnologías, sigue existiendo un problema relevante: el comportamiento impredecible y caótico de los conductores al volante, que dificulta enormemente las tareas de gestión del tráfico.

5.1.1.2. Gestión del tráfico aéreo

La aviación civil es un sistema muy complejo en el que los transportistas, los proveedores del control del tráfico, la gestión del tráfico aéreo, la industria manufacturera, los talleres de mantenimiento, las autoridades nacionales de aviación, las autoridades internacionales y



los aeropuertos tienen que trabajar de una manera estrechamente coordinada para garantizar un sistema seguro y eficiente en tiempo y coste de aviación.

La primera torre de control de tráfico aéreo data del año 1920, en el aeropuerto de Croydon que en aquel momento era el principal aeropuerto de Londres. Era una estructura de madera de unos 4,6 metros de altura, con ventanas en las cuatro paredes que permitían una visión completa del entorno. Su misión era proporcionar a los pilotos información básica sobre el tráfico, las condiciones meteorológicas e información local a los pilotos [128]. No obstante, no sería hasta el año 1956 cuando se produjo el punto de inflexión, como consecuencia de la colisión aérea del Gran Cañón, donde dos aeronaves chocaron en vuelo en un espacio aéreo no controlado, dando lugar al fallecimiento de los 128 ocupantes de ambas aeronaves. Dos años más tarde se otorgó a la FAA la responsabilidad del control del tráfico aéreo sobre América. En los años posteriores, el resto de naciones hicieron lo propio, destacando la fundación de Eurocontrol en el año 1960 con el objetivo de fusionar espacios aéreos en Europa [129]. En la historia de la aviación han sido los accidentes más relevantes los causantes de los grandes avances en los protocolos de seguridad.

Hay dos conceptos ampliamente utilizados en la aviación. El control del tráfico aéreo, conocido como ATC (*Air Traffic Control*), y la gestión del tráfico aéreo conocida como ATM (*Air Traffic Management*). La función principal de la gestión del tráfico aéreo es asignar el espacio aéreo a los usuarios para que cada uno de ellos reciba una parte razonable, permitiéndoles cumplir sus tareas y prosperar.

El transporte aéreo es el modo de transporte más seguro que existe. Hay dos condiciones fundamentales que permitirán mantener esta seguridad y un crecimiento ordenado del sector: la aplicación de las prácticas y estándares recomendados por la OACI y la implementación de sistemas CNS/ATM (*Communications, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management*). La definición hecha por la OACI de sistemas CNS/ATM es: "Sistemas de comunicación, navegación y vigilancia, que emplean tecnologías digitales, incluidos sistemas satelitales, con varios niveles de automatización, aplicados en apoyo a un sistema ATM sin fisuras" [130].

La OACI es el principal organismo internacional de la aviación, y en su Anexo 11 realiza una amplia descripción de los servicios de tránsito aéreo, incluyendo el control y la gestión del tráfico aéreos. Los objetivos de los servicios de tránsito aéreo son [131]:

1. Prevenir colisiones entre aeronaves.
2. Prevenir colisiones entre aeronaves en el área de maniobras y entre esas y los obstáculos que haya en dicha área.
3. Acelerar y mantener ordenadamente el movimiento del tránsito aéreo.
4. Asesorar y proporcionar información útil para la marcha segura y eficaz de los vuelos.
5. Notificar a los organismos pertinentes respecto a las aeronaves que necesitan ayuda de búsqueda y salvamento, y auxiliar a dichos organismos según sea necesario.

La evolución de los sistemas de gestión del tráfico es una característica imprescindible en la mejora de la eficiencia y seguridad del transporte aéreo. Existen dos programas destacados, NextGen y SESAR.



En Estados Unidos se desarrolla el programa NextGen (*Next Generation Air Transportation System*) para la modernización completa de su sistema nacional del espacio aéreo. Es un conjunto completo de actualizaciones, tecnologías y procedimientos que mejoran cada fase de vuelo y permiten que las aeronaves se muevan de manera más eficiente desde la salida a la llegada. NextGen utilizará tecnología satelital para mejorar la navegación y la vigilancia, implementará sistemas digitales para las comunicaciones y mejorará la gestión de la información. Este programa reemplaza los sistemas de automatización y agrega más capacidades operativas al sistema del espacio aéreo.

En el año 2001 la Unión Europea decidió la creación del Cielo Único Europeo, con el objetivo de establecer un único centro de gestión de flujos del tráfico aéreo. Esta iniciativa se acabaría traduciendo en el programa SESAR (*Single European Sky ATM Research*), que tiene como pilar tecnológico el objetivo de definir, desarrollar y desplegar las soluciones operativas con los habilitadores tecnológicos necesarios para aumentar el rendimiento del sistema de gestión del tráfico aéreo (ATM) de Europa. Su ciclo de vida se compone de estas partes: definición, desarrollo e implementación.

Son dos programas fundamentales en la actualidad en la gestión del tráfico aéreo. En el año 2011 se estableció un memorándum de cooperación en el ámbito de investigación y desarrollo de la aviación civil, incluyendo la cooperación entre ambas iniciativas (NextGen y SESAR), con el objetivo de encontrar la armonización que garantizase la seguridad operativa global [132].

5.1.1.2.1. Integración de los UAVs en el espacio aéreo

Desde comienzo de los años 1990, los vehículos aéreos no tripulados han operado en espacios aéreos controlados, principalmente en Estados Unidos. Se creó por tanto la necesidad de integrar los UAV en los diferentes espacios aéreos. La lista de potenciales usuarios de este tipo de aeronaves ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, así como las aplicaciones y servicios comerciales en operaciones civiles. El objetivo es integrar estos vehículos sin reducir la capacidad existente, ni reducir la seguridad, ni suponer un impacto negativo para los operadores actuales o incrementar el riesgo de los usuarios del espacio aéreo o las personas o propiedades que se encuentran en tierra [53].

Durante estos últimos años las diferentes autoridades aéreas, en función de su ámbito de competencias, han ido desarrollando e incorporando nuevas regulaciones, acciones políticas, procedimientos, material de ayuda y formación, para favorecer y posibilitar esta integración. La gestión del tráfico aéreo tiene un papel básico en la aviación, y por tanto en esta integración de los UAV. La NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) fue una de las organizaciones pioneras en trabajar en este campo. Hace unos años comenzó a explorar el diseño funcional, desarrollo conceptual y tecnológico y prototipado de un sistema UTM (*UAS Traffic Management*). El objetivo del sistema UTM es permitir operaciones seguras y eficientes en el espacio aéreo de baja altitud proporcionando servicios tales como el diseño y configuración dinámica del espacio aéreo, geo-cercas dinámicas, prevención de condiciones climáticas adversas, gestión de la congestión, evitar el terreno, planificación y redirección de rutas, gestión de separaciones aéreas, secuenciación y espaciado, y gestión de contingencias. Es un sistema que permitirá acelerar el desarrollo y utilización de las aplicaciones civiles de los UAS, proporcionando



apoyo tanto a aquellas aeronaves con mínimas capacidades de aviónica, como a aquellas con altas capacidades autónomas [133].

En la actualidad las operaciones de aeronaves no tripuladas a gran escala no son posibles en el espacio aéreo de baja altitud. Existe una necesidad global de conceptos, requisitos de operaciones, tecnologías y un camino hacia las operaciones seguras a gran escala. Estos nuevos conceptos deben considerar tres dimensiones principales [134]:

1. Garantizar la seguridad regional y nacional. Es un requisito fundamental que la seguridad esté garantizada en las operaciones en cielos de baja cota. Estas consideraciones de seguridad incluyen la protección de activos y lugares estratégicos, las operaciones en aeropuertos, protección de monumentos, etc.
2. Operaciones seguras en el espacio aéreo. Es importante que estas operaciones se habiliten de forma que se garantice la seguridad de operaciones tanto de otros UAS como en presencia de la aviación tradicional. La seguridad debe estar garantizada tanto en operaciones múltiples como en vuelos individuales.
3. Valor económico de las operaciones en el espacio aéreo de baja altitud. La utilización del espacio aéreo con fines comerciales, de seguridad pública y de usos personales mediante la recopilación de datos o el transporte de objetos o personas proporcionará un enorme beneficio económico. La industria ya ha invertido más de un billón de dólares en este sector.

El sistema UTM está fundamentado en los principios y el aprendizaje obtenido durante varias décadas en los sistemas ATM. A pesar de estar orientado directamente a la gestión de aeronaves no tripuladas, con una visión a que en el medio plazo la gran mayoría de ellas presentarán altas capacidades autónomas, y la existencia de conceptos y procedimientos muy similares. La concepción actual de este sistema presenta notables diferencias con el modelo que se desarrolla en esta tesis doctoral.

5.1.1.3. Gestión del tráfico marítimo

En el ámbito marítimo, la gestión del tráfico no está formalmente organizada. Cada barco es independiente y encuentra su propia ruta para llegar al destino. Los conflictos se resuelven de manera local. El tráfico se organiza mediante reglas, regulaciones y “buena navegación”. La tripulación de abordaje es responsable del control del barco, la planificación, las rutas y la separación con otros barcos y obstáculos. En áreas de alta densidad de tráfico se cuenta con el apoyo de los servicios de tráfico a embarcaciones, o VTS (*Vessel Traffic Service*), para promover la seguridad y fluidez del tráfico. Los VTS son servicios de información para determinadas áreas, no toman el control. Ayudan al tráfico a través de consejos de navegación y asistencia, previa solicitud y, además, pueden proporcionar un servicio de organización del tráfico en algunas áreas. Los operadores VTS monitorean el uso adecuado de las regulaciones, pero no tienen ningún mandato legal para planificar, asignar rutas o separar el tráfico marítimo de manera activa.

Es un modelo de gestión distribuido, que contrasta notablemente con el sistema ATM del tráfico aéreo, por ejemplo. Esta organización distribuida del control del tráfico marítimo está profundamente arraigada en el desarrollo histórico de la navegación mercante, con las reglas que entraron en vigor en la década de 1840 para coordinar la prevención de colisiones entre barcos de vapor y veleros [135]. El primer seguimiento del tráfico marítimo



realizado por operadores de tierra se estableció en 1948 en Douglas, en la Isla de Man. Era un sistema basado en estaciones de Radar en tierra y comunicaciones para disminuir los retrasos causados por las malas condiciones climáticas, así como para aumentar la eficiencia y seguridad de los accesos al puerto [136].

En el tráfico marítimo existen tres actores principales:

1. Servicios VTS. Los VTS ofrecen servicios implementados por una Autoridad Competente, diseñados para mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico de embarcaciones, y para proteger el medio ambiente. Los servicios deben tener la capacidad de interactuar con el tráfico y de responder a las diferentes situaciones de tráfico que se produzcan en su área [137]. La Organización Marítima Internacional (IMO) reconoce tres servicios que pueden ofrecer los centros VTS: servicio de información (INS), servicio de organización del tráfico (TOS) y asesoramiento y asistencia a la navegación (NAS) [136]. En la actualidad hay alrededor de 500 sistemas VTS en todo el mundo. A pesar de que estos servicios siguen unas guías internacionales, han sido implementados de acuerdo a los estándares nacionales, dando lugar a una gran variedad de servicios ofrecidos por los operadores en las diferentes áreas [135].
2. La embarcación. La navegación de un barco se realiza por un equipo, que es responsable de la planificación del viaje y su ejecución segura. Un equipo típico consta de un timonel, un oficial de navegación, un capitán y un piloto en el área de interés. El timonel se encarga del control del timón, el oficial de navegación, habitualmente está a cargo de la navegación y controla el motor, el capitán tiene el control de todo el proceso, y cuando un piloto está a bordo realiza la navegación.
3. El piloto. Es un experto en navegación local que sube a bordo para ayudar al equipo con la navegación. Aunque es un asesor, en la mayoría de las ocasiones actúa como oficial de navegación. El piloto conoce las rutas, el fondo marino, las boyas, los muelles, las corrientes, la marea, el trabajo planificado y el tráfico [135].

En este sistema de control del tráfico distribuido, la seguridad y eficiencia solo se puede conseguir gracias al compromiso individual de cada uno de los actores involucrados en el sistema. El constante incremento del volumen de tráfico que se está produciendo muestra las limitaciones de este sistema, y la necesidad de nuevos recursos para poder mantener los objetivos de seguridad y eficiencia. Cada vez son más los autores que defienden la necesidad de un control del tráfico centralizado [135], [138]. La irrupción de la navegación marina autónoma pone aún más de manifiesto esta necesidad. A pesar de ello, en la actualidad todavía no se ha desarrollado ningún sistema de gestión del tráfico para embarcaciones autónomas.

5.1.1.4. Gestión convencional del tráfico vs Gestión automatizada del tráfico

El papel que tiene la gestión del tráfico en los diferentes modos de transporte es muy diferente. En el tráfico rodado se comenzó a trabajar en técnicas de gestión debido al gran aumento de la congestión y la siniestralidad. El tráfico rodado se caracteriza por ser altamente anárquico, donde cada conductor particular tiene el control absoluto sobre el trayecto que está realizando. En este medio, la gestión se focaliza en el control de determinados flujos de vehículos y sistemas de ayuda o soporte a los conductores. En el



transporte aéreo la gestión del tráfico tiene un rol fundamental, con el principal objetivo de controlar los flujos de tráfico para evitar accidentes, lleva implementada más de 70 años a nivel global. En la actualidad toda aeronave está perfectamente identificada y controlada por las diferentes autoridades competentes. La gestión del tráfico en el transporte marino se ha planteado como una cuestión secundaria hasta hace relativamente poco, debido al gran crecimiento que está experimentando este sector.

La gestión automatizada del tráfico seguirá unos principios comunes en todos los medios de transporte, incluyendo determinadas particularidades para cada uno de ellos. Su esencia tendrá un mayor número de similitudes con la gestión del tráfico aéreo, teniendo en cuenta que es el ámbito en el que está más desarrollada, que es el medio de transporte más seguro, y que ya se ha trabajado en la gestión de ingenios autónomos aéreos.

La mayor diferencia que existe entre la gestión del tráfico convencional y la gestión del tráfico automatizada radica en el planteamiento inicial de diseño del sistema. En cualquiera de los modos de transporte convencionales, la gestión del tráfico se incorporó décadas después de su comienzo, como es el caso del transporte aéreo o rodado, o siglos, en el caso del transporte rodado o marino. Y esta incorporación posterior se hizo a modo de solución de problemas que fueron surgiendo. Se tuvo que adaptar el conjunto de medidas implementadas a las características de cada uno de estos modos de transporte. En cambio, en el diseño de un sistema de transporte automatizado, la gestión del tráfico tendrá un rol principal desde el comienzo, diseñando el conjunto de elementos del sistema para que encajen adecuadamente con las técnicas de gestión correspondientes.

5.1.2. Funcionalidades y requisitos de la gestión automatizada del tráfico

Los principios y fundamentos teóricos de la gestión automatizada del tráfico coinciden en su esencia con los de cualquier técnica de gestión del tráfico conocida. Los objetivos fundamentales de la gestión del tráfico automatizada son:

1. Eficiencia. La eficiencia en el tráfico es la capacidad del sistema de transporte para cumplir de manera adecuada el objetivo de los distintos vehículos, es decir, desplazarse desde un origen hasta un destino. La congestión en el tráfico es el fenómeno en el que un elevado número de vehículos colapsan una determinada vía de circulación. Es una deducción obvia que la congestión imposibilita la eficiencia en el tráfico. Solucionar los problemas de congestión es una tarea primordial.
2. Seguridad. Las técnicas de control en la planificación y desarrollo de los desplazamientos de los diferentes vehículos se implementan con el objetivo de evitar conflictos de interés y sobre todo colisiones. El control del tráfico permite incrementar los niveles de seguridad de un determinado sistema a otra escala, que no se puede alcanzar sin la implementación de técnicas de este tipo.

Tomando como referencia estos dos fundamentos básicos en los que se sustenta la gestión automatizada del tráfico, se desarrolla el listado de funcionalidades y requisitos que ha de tener la gestión del tráfico de los ingenios autónomos:

- Planificación y gestión de rutas.
- Control, gestión y monitorización de los ingenios.



- Atributos de autoridad.
- Triple Click y gestión de preferencias.
- Gestión de operadores y usuarios.
- Gestión de infraestructuras.
- Gestión de la red de comunicaciones.
- Capacidad de comunicación con otros sistemas e infraestructuras de transporte.
- Capacidad de auto análisis.

En los siguientes apartados se describen y analizan cada uno de estos requisitos y funcionalidades.

5.1.2.1. Planificación y gestión de rutas

Uno de los requisitos fundamentales para lograr los objetivos de eficiencia en el tráfico es la planificación y gestión de rutas. La infraestructura de control del tráfico automatizada debe tener las competencias de planificación de rutas, monitorización y supervisión de rutas y modificación de rutas.

Una ruta es el camino establecido para el viaje o misión de un determinado ingenio, que se inicia en un origen y finaliza en un destino. En el nuevo modelo de movilidad, y dependiendo del modo de transporte que se trate, existirán diferentes tipos de rutas. Esta variedad en las rutas se debe tanto a las características físicas del medio, bien se desarrollen en el ámbito terrestre por carreteras, en el ámbito aéreo por aerovías o en el mar sobre el agua. El tratamiento de las diferentes rutas, con independencia de sus características físicas, será realizado de igual manera en los diferentes modos. Los diferentes viales serán digitalizados y se realizará una planificación y gestión de las diferentes rutas con computadores.

La movilidad estará caracterizada a su vez por la existencia de transporte regular, que tenga una planificación previa y se conozcan las rutas con antelación, y transporte bajo demanda, que bien podrá solicitarse con determinada antelación o de manera instantánea. La planificación de las rutas tiene un papel esencial en la búsqueda de la eficiencia del tráfico. En un escenario en el que se conocen con antelación las rutas de todos los ingenios que van a circular en una determinada región, en un mismo periodo temporal, se pueden aplicar técnicas de optimización del conjunto de rutas. El transporte bajo demanda o no planificado es el que plantea un grado superior de complejidad al problema, al introducir en la ecuación variables que no han sido previstas. No obstante, se pueden realizar estudios de los diferentes patrones de movilidad de una determinada población, en diferentes situaciones y escenarios. Combinando los patrones obtenidos con los datos de los viajes realizados por el conjunto de ingenios, y aplicando técnicas de Big Data e inteligencia artificial se pueden integrar en el sistema de planificación de rutas estas variables no planificadas.

La gestión de rutas, además de la planificación y asignación de rutas óptimas a cada ingenio, implica el seguimiento y monitorización de cada una de las rutas que se realizan en tiempo real. Esto permite obtener una radiografía del estado del tráfico en todo momento. El sistema de gestión integrará las capacidades de planificación y seguimiento en tiempo real, para estar de manera constante actualizando los datos y realizando las modificaciones que sean convenientes de manera dinámica. Esto posibilita integrar aquellas rutas no planificadas en todo momento, así como la posibilidad de realizar modificaciones de las



rutas planificadas o aquellas que se están llevando a cabo, tanto por necesidad como por motivos de voluntad de los diferentes usuarios.

La función principal del sistema de gestión de rutas es obtener la solución óptima para el conjunto de ingenios, de tal manera que se busque el beneficio colectivo del conjunto de vehículos, por encima del beneficio particular de un determinado ingenio. El sistema de gestión de rutas, dentro del marco de la eficiencia del conjunto de flujos de tráfico, calculará la ruta óptima para cada uno de estos ingenios. No obstante, el sistema de gestión de rutas en un sistema de transporte integral tendrá definidas diferentes tipos de rutas, para dar cabida a la amplia variedad de circunstancias que se puedan desarrollar en el transcurso diario del transporte de ingenios. Esta variedad en las rutas estará definida tanto por los criterios de ruta (óptima, más corta, más larga, más rápida, menor gasto energético, personalizada, etc.), como por las prioridades, integrando un sistema de gestión de preferencias, dependiendo del tipo de ingenio o misión que realice (ingenios de emergencia, policiales, transporte de mercancías peligrosas, misión de investigación judicial, etc.).

5.1.2.2. Control, gestión y monitorización de ingenios

La gestión de rutas, descrita en el apartado anterior, es una cuestión, y otra diferente es la gestión de ingenios. Haciendo un análisis genérico, se podría decir que la gestión de rutas está orientada a la consecución de la eficiencia en el tráfico, mientras que la gestión de los ingenios está orientada a la seguridad en el tráfico. Aunque en realidad ambos sistemas contribuyen tanto en la eficiencia como en la seguridad.

Una de las funciones del sistema de gestión del tráfico es la monitorización en tiempo real de cada uno de los ingenios que se encuentren bajo su tutela. Esta monitorización permite al sistema obtener una información precisa de cuál es el estado de cada ingenio en todo momento, siendo capaz de adelantarse ante la eventual aparición de fallos o situaciones de conflicto. Además de esta capacidad de prevención, el sistema podrá contar con la capacidad de comunicación en tiempo real al conjunto de ingenios de cualquier fallo o conflicto que se produzca.

Otra de las funciones del sistema de gestión de ingenios es el control de los diferentes ingenios. Además de la ruta asignada, el centro de control podrá transmitir determinadas órdenes a los diferentes ingenios, orientadas a la gestión de preferencias o en situaciones en las que se produzcan circunstancias extraordinarias.

El sistema de gestión de ingenios tendrá un gran impacto sobre el tráfico, posibilitando una redefinición de las actuales reglas de circulación, dando lugar a un nuevo sistema de circulación adaptado a la tecnología de los ingenios autónomos.

5.1.2.3. Atributos de autoridad

Analizando las dos primeras funcionalidades de la gestión del tráfico automatizada, descritas en los apartados anteriores, se puede deducir la tercera. El sistema de gestión del tráfico autónomo tiene la competencia de actuar como autoridad del tráfico.



Los Centros de Control del Tráfico (CCTs) gozan de los atributos que les otorgan la potestad para dar órdenes a los ingenios en el ejercicio de sus desplazamientos. Los principales atributos de la autoridad del tráfico son:

1. Ordenación del tráfico. En la actualidad el tráfico en los distintos modos de transporte está regulado por diferentes códigos y normativas de circulación o navegación. Los ingenios autónomos se adaptan en gran medida a estas regulaciones, pero también necesitan nuevas regulaciones, debido a sus características. Las capacidades tecnológicas de los ingenios permiten diseñar un nuevo sistema de regulación del tráfico, que será dinámico y se podrá adaptar a las diferentes circunstancias de manera instantánea. La ordenación de estas regulaciones, así como la gestión dinámica de las mismas será una función de la autoridad del tráfico, los CCTs.
2. Asignación y modificación de rutas. La gestión centralizada de las rutas del conjunto de ingenios es fundamental para lograr la eficiencia en el conjunto del tráfico. Esta función es otra competencia de la autoridad del tráfico. Los CCTs calcularán la ruta óptima para cada ingenio, teniendo en cuenta el estado del tráfico en general y las particularidades de la ruta solicitada por cada ingenio, y se la asignarán. De la misma forma, tendrán la competencia de modificar dichas rutas en caso de necesidad.
3. Tercero Autorizado. El concepto de “Tercero Autorizado” representa un nuevo título jurídico que permite la intervención de un determinado ingenio cuando se den las circunstancias necesarias. Esta competencia tiene implicaciones en el diseño tanto del sistema de control del tráfico, como en el diseño del sistema autónomo de los ingenios. La intervención de los ingenios, salvo circunstancias extraordinarias, será mediante órdenes de alto nivel, del tipo “informa de tu situación”, “para”, “cambia de ruta”, “vuelve a la base”, etc. Las circunstancias por las que sea necesario intervenir pueden ser cuando un ingenio se encuentre desvalido y emita una señal de ayuda, cuando se detecten intenciones maliciosas, cuando alguna autoridad competente lo considere necesario o en situaciones de emergencia.

La implementación de este sistema de transporte automatizado tendrá importantes implicaciones legislativas, analizadas en el capítulo 6 de esta tesis, siendo las competencias de autoridad del tráfico una cuestión de gran importancia que requerirá un amplio desarrollo.

5.1.2.4. Triple Click y gestión de preferencias

El despliegue e implementación de un sistema de transporte automatizado ha de satisfacer el conjunto de necesidades de movilidad existentes. Esto implica que debe proporcionar cobertura y servicio a operaciones de ámbito civil, policial y militar. El concepto “Triple Click” hace referencia a esta funcionalidad. El sistema automatizado de transporte y la infraestructura desplegada han de dar servicio y satisfacer las necesidades de los tres sectores. No tiene sentido plantear el diseño de tres sistemas diferentes debido a su gran magnitud y al notable incremento en el coste que supondría.

La inmensa mayoría de los desplazamientos que se realizan en un país son de carácter civil, bien sea por desplazamientos de usuarios privados o por desplazamientos en el ámbito profesional.



El ámbito policial desempeña un papel muy importante en el transporte. Algunas de las operaciones policiales tienen unos requerimientos especiales, tanto desde el punto de vista de las prioridades, como desde el punto de vista de la privacidad. En situaciones en las que se desarrolle una misión policial, considerada como una situación de emergencia, estos ingenios tendrán una clara prioridad en sus desplazamientos y podrán afectar a las rutas de otros ingenios. En determinadas operaciones de investigación requerirán un nivel de opacidad especial. Estas necesidades especiales requieren del desarrollo de protocolos específicos en el ámbito de la gestión y control del tráfico automatizado. Además, la presencia de los cuerpos policiales en los Centros de Control del Tráfico será fundamental en las actividades de supervisión y monitorización que les competen. Será necesaria una estrecha colaboración con los cuerpos policiales en el diseño detallado y despliegue de estos protocolos específicos.

Las operaciones militares tienen unas características muy concretas. El sistema de transporte automatizado se desplegará en el territorio nacional, donde salvo situación excepcional, no se darán las condiciones de conflicto bélico. No obstante, las fuerzas armadas desarrollan gran parte de su actividad dentro del territorio nacional, y desde el punto de vista de las necesidades de movilidad, sus operaciones son principalmente logísticas, tanto en el transporte de tropas como de material. Estas operaciones logísticas pueden requerir de unos protocolos de seguridad especiales. Además, determinadas unidades, como puede ser la Unidad Militar de Emergencias, desempeñan su actividad dentro del territorio nacional, y han de tener la infraestructura preparada para su rápido despliegue cuando sea necesario. El sistema de gestión del transporte ha de contemplar situaciones en las que sea necesaria una intervención militar en una determinada región.

La integración de estos tres ámbitos en un mismo sistema de gestión del transporte hace imprescindible la generación de un sistema de gestión de preferencias. Este sistema de gestión de preferencias ha de incluir las prioridades de los diferentes tipos de ingenios, bien sean civiles, policiales o militares.

5.1.2.5. Gestión de operadores y usuarios

Las primeras funciones descritas del sistema de gestión del tráfico automatizado implican una relación directa entre el Centro de Control de Tráfico y los diferentes ingenios. Pero en la ecuación de la movilidad también están presentes los operadores de flotas de ingenios o propietarios particulares, así como los usuarios finales.

Los operadores o propietarios son los dueños de los ingenios, y responsables de su mantenimiento y actividad. Serán a su vez los que contraten los diferentes servicios que proporcionan los Centros de Control de Tráfico. Por lo tanto, el sistema de gestión de operadores y usuarios será el encargado de las relaciones entre los diferentes agentes, proporcionando las herramientas necesarias para establecer las relaciones administrativas y/o contractuales entre las diferentes partes.

Al mismo tiempo, este sistema se encargará de la generación de los diferentes historiales de operaciones realizadas por los ingenios correspondientes a los diferentes operadores o propietarios. El objetivo principal de la gestión automatizada del tráfico es el control y gestión de los ingenios, no de los usuarios finales, cuya gestión recaerá en los operadores de flota. Se reservarán los derechos de información respecto a los usuarios aquellas



autoridades con competencias para ello que formen parte de la estructura de gestión y control integrada dentro de los Centros de Control de Tráfico.

5.1.2.6. Gestión de infraestructuras

Los Centros de Control de Tráfico son la infraestructura que permitirá la gestión automatizada del tráfico. Estos centros, a su vez, estarán formados por una infraestructura tanto física como digital.

La monitorización y control en tiempo real de la propia infraestructura es una de las funciones principales de la gestión automatizada del tráfico.

Gran parte de los sistemas y herramientas que conforman los Centros de Control de Tráfico estarán soportados por una gran base de datos, cuyo control y gestión ha de estar incluida.

La infraestructura de gestión del tráfico, tal y como se describe en el apartado 5.1.3, es una arquitectura compleja, formada a su vez por numerosos elementos distribuidos, tanto en salas de control, como en centros de datos distribuidos a lo largo del territorio. El sistema de gestión de infraestructuras requerirá de un importante desarrollo y planificación logística, para que pueda desempeñar sus funciones de manera apropiada, ya que su correcto funcionamiento permitirá la operatividad del resto de servicios.

5.1.2.7. Gestión de la red de comunicaciones

La red de comunicaciones o Red S3 se describe detalladamente en el apartado 5.3 de este capítulo. Esta red es la infraestructura que hace posible establecer las comunicaciones entre el sistema de gestión automatizada del tráfico y los diferentes ingenios. La gestión de la red será una función destacada del sistema de gestión del tráfico.

Al mismo tiempo, otra función importante será la gestión del conjunto de infraestructuras y dispositivos que conforman la red.

5.1.2.8. Capacidad de comunicación con otros sistemas e infraestructuras de transporte

El propósito del diseño de este sistema automatizado de transporte es proporcionar cobertura a nivel nacional a la movilidad autónoma, tanto terrestre, como en la navegación aérea de baja cota, como en la navegación marina de cabotaje. Existen dos razones principales que hacen necesaria la conectividad de este sistema con otros sistemas de transporte.

Por un lado, está el despliegue progresivo de este sistema. Durante el periodo de transición del actual sistema de transporte a la movilidad autónoma, habrá un tiempo de convivencia entre diferentes sistemas de transporte, y las comunicaciones entre ellos serán de gran importancia para incrementar la seguridad colectiva.

Por otra parte, incluso en el momento que se haya desplegado al completo, será necesaria la cooperación con otros sistemas de transporte, como puede ser la aviación convencional, el sistema ATM, o el ferrocarril. Los intercambios de información entre estos sistemas



representan un aspecto muy relevante, con vistas al objetivo de la optimización de los diferentes flujos de tráfico.

De igual modo, no hay que olvidar que cada país será el responsable de la gestión de su propio tráfico, por lo que habrá que trabajar en el desarrollo e implementación de estándares y protocolos internacionales que faciliten la movilidad internacional en los diferentes modos de transporte.

El diseño de los sistemas de comunicación con otros sistemas de transporte será otra de las funciones principales, siendo uno de sus requisitos de diseño la seguridad, para que en ningún momento se vean comprometidos los estándares de fiabilidad de los ingenios autónomos.

5.1.2.9. Capacidad de auto análisis

La gestión automatizada del tráfico es un elemento crítico en la automatización del tráfico. Se han descrito las funciones más importantes de este sistema, siendo una de ellas la gestión del conjunto de infraestructuras que componen el sistema de gestión del tráfico. Además de la gestión del propio sistema, una función primordial es la capacidad de auto análisis, tanto de las diferentes partes por separado como del conjunto del sistema. Estos análisis de estado se podrán realizar en cualquier momento. El objetivo es que el propio sistema detecte posibles anomalías y fallos, de manera instantánea y pueda tomar las medidas o emitir los avisos necesarios, para solucionarlos y garantizar la continuidad en su funcionamiento.

5.1.3. Centros de Control del Tráfico

La concepción tradicional de un centro de control es la de una sala desde la que se supervisa el tráfico de una determinada región, como puede ser una torre de control en cualquier aeropuerto o la sala de control del tráfico de un ayuntamiento. En definitiva, un lugar donde los diferentes controladores o autoridades se encargan de la monitorización y gestión del tráfico bajo su tutela.

La gestión automatizada del tráfico se caracteriza por gestionar ingenios que son autónomos, con elevadas capacidades de procesamiento y computación de información, muy superiores a los procesos que puede gestionar cualquier persona. Esto implica necesariamente que la gestión del tráfico se realice de forma automatizada o autónoma, para igualar sus capacidades a las de los ingenios y poder proporcionar los servicios que necesitan.

En el diseño del sistema de transporte autónomo para un país, en este caso España, un dato muy relevante es la cantidad de ingenios que van a navegar. En el capítulo 7 de esta tesis se realiza un estudio de la evolución del parque móvil, que aporta las previsiones del número de ingenios que navegarán en España. Estamos hablando de varios millones de ingenios. Conociendo este dato, se puede realizar el dimensionado de las capacidades que ha de tener el sistema de gestión automatizada del transporte.

La infraestructura de gestión del tráfico automatizado requerirá de muy altas capacidades de computación, teniendo un elevado nivel de complejidad. El concepto de Centro de



Control de Tráfico (CCT) se emplea para referirse al conjunto de la infraestructura de gestión del tráfico. A su vez, el CCT estará formado por dos infraestructuras principales, los Centros de Procesamiento de Datos (CPD) y las Salas de Control de Tráfico (SCT).

5.1.3.1. Centros de Procesamiento de Datos

Un Centro de Procesamiento de Datos (CPD) es la infraestructura dedicada al tratamiento de datos relacionados con el tráfico de ingenios, mediante computación. Contiene uno o más clústeres de cómputo distribuido, además de los sistemas auxiliares para los computadores: cableado, conexiones, sistemas de refrigeración. Cada CPD será un edificio o sala de grandes dimensiones en la que se ubica una gran cantidad de equipamiento. En cuanto al funcionamiento operativo, se asemeja bastante al funcionamiento de cualquier gran Centro de Datos existente en la actualidad. La infraestructura está regulada por el estándar TIA-942, definiendo cuatro subsistemas [139]:

1. Telecomunicaciones: Cableado de armarios y accesos redundantes, cuarto de entrada, área de distribución, *backbone*, elementos activos y alimentación redundantes, *patch panels* y latiguillos, documentación.
2. Arquitectura: Selección de ubicación, tipo de construcción, protección ignífuga y requerimientos NFPA 75 (sistemas de protección contra el fuego para información), barreras de vapor, techos y pisos, áreas de oficina, salas de UPS y baterías, sala de generador, control de acceso, CCTV (circuito cerrado de televisión), NOC (centro de operaciones de red – centro operativo).
3. Sistema eléctrico: Número de accesos, puntos de fallo, cargas críticas, redundancia de UPS y topología de UPS, puesta a tierra, EPO (apagado de emergencia - sistemas de corte de emergencia), baterías, monitorización, generadores, sistemas de transferencia.
4. Sistema mecánico: Climatización, presión positiva, tuberías y drenajes, CRACs y condensadores, control de HVAC (aire acondicionado de alta ventilación), detección de incendios y *sprinklers*, extinción por agente limpio (NFPA 2001), detección por aspiración (ASD), detección de líquidos.

El transporte es una actividad esencial y estratégica dentro de cada país, por lo que la infraestructura de la que depende la gestión del tráfico autónomo ha de tener una serie de consideraciones especiales. La más relevante es la consideración de infraestructura crítica, de acuerdo con la Ley 8/2011, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas. Se considera infraestructura crítica a “las infraestructuras estratégicas cuyo funcionamiento es indispensable y no permite soluciones alternativas, por lo que su perturbación o destrucción tendría un grave impacto sobre los servicios esenciales [140]. En el caso de un CCT, que da un servicio integral al transporte, actividad esencial en cualquier país, resulta evidente esta consideración de infraestructura crítica y, por tanto, necesaria la implementación de las medidas de seguridad y protección detalladas en la citada ley.

La seguridad es el elemento central en la calificación de infraestructura crítica. Además de la seguridad, existe otro elemento clave, la fiabilidad. Para este estándar se encuentra la clasificación de los Centros de Datos en cuatro grupos denominadas TIER, indicando de esta forma su nivel de fiabilidad en función de su disponibilidad. Las certificaciones TIER se dan sobre los aspectos de los subsistemas mencionados anteriormente.

Tabla 5. 1. Clasificación TIER para Centros de Datos [139].

TIER	% Disponibilidad	% Parada	Tiempo anual de parada
I	99,67%	0,33%	28,82 horas
II	99,74%	0,25%	22,68 horas
III	99,982%	0,02%	1,57 horas
IV	100,00%	0,01%	52,56 minutos

El nivel de fiabilidad de un Centro de Datos viene indicado por uno de los cuatro niveles de fiabilidad llamados TIER, en función de su redundancia (Tabla 5. 1). A mayor número de TIER, mayor disponibilidad y, por tanto, mayores costes de construcción y mantenimiento. Las características operativas del sistema de transporte implican la necesidad de una certificación TIER IV.

La combinación de estos requisitos de seguridad y fiabilidad dan lugar a otra característica relevante, la dedicación exclusiva. Los CPD se diseñarán para dar servicios exclusivos para el transporte autónomo.

5.1.3.1.1. Localización y distribución de los CPD

La consideración de infraestructura crítica pone de manifiesto la gran importancia de la localización de los Centros de Procesamiento de Datos, así como la estrategia empleada en la distribución de estos.

La opción de emplear un único CPD para la gestión y control de todo el tráfico de un país se descarta por razones de seguridad evidentes. Partiendo de esta premisa, existen dos estrategias principales en cuanto a la distribución de los CPD:

1. Pocos Centros de Procesamiento de Datos de gran tamaño distribuidos en función de la densidad de población (tráfico) (Figura 5. 2).
2. Muchos Centros de Procesamiento de Datos de pequeño tamaño (Figura 5. 3).

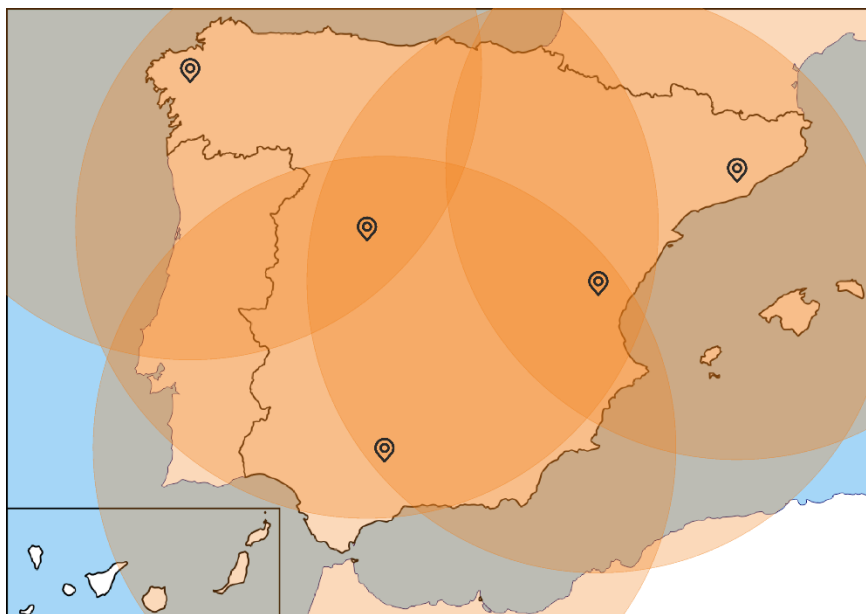


Figura 5. 2. Estrategia de distribución de pocos CPD de gran tamaño.

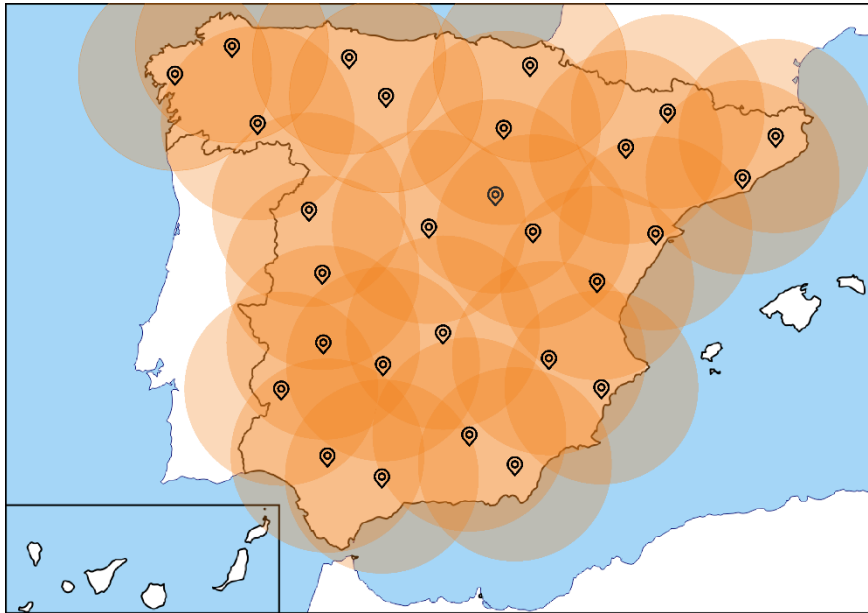


Figura 5. 3. Estrategia de distribución de muchos CPD de pequeño tamaño.

Los principales criterios de diseño son la redundancia y la latencia. El criterio de redundancia establece que en caso de fallo de un CPD haya otro que pueda asumir al completo las tareas que este realiza, sin penalizar la calidad del servicio en ningún momento. El segundo criterio implica mantener la latencia en las comunicaciones, entre el CPD y los ingenios, lo más baja posible.

La opción más adecuada pasa por la minimización del número de CPD, sin penalizar ni la redundancia ni la latencia. De esta forma se consiguen reducir los costes, los riesgos de seguridad y los costes operacionales, debido a la menor necesidad de mover datos de un CPD a otro. Por lo tanto, se optará por la primera estrategia de distribución, pocos CPD de gran tamaño distribuidos en el territorio nacional en función de la densidad de tráfico.

No es objeto de esta tesis determinar el número exacto de CPD ni la ubicación de estos, sino la estrategia de diseño a seguir para el sistema de transporte automatizado. La decisión sobre estas cuestiones implicará realizar estudios específicos y análisis sobre las características de las diferentes ubicaciones, las densidades de población y tráfico a los que darán servicio, las comunicaciones entre ellos, así como la colaboración con las diferentes autoridades y administraciones afectadas.

5.1.3.1.2. Dimensionamiento de la capacidad de computación global

Para conocer la capacidad de cómputo necesaria, primero hay que analizar la relación entre el cómputo y el volumen de datos. En base al estado actual y un análisis de la evolución del parque móvil en España, analizado más adelante en esta tesis, se estiman unos 30 Millones de ingenios. Habitualmente la forma de medir un centro de computación es mediante las MFLOPS (millones de operaciones de coma flotante por segundo), simplificando el análisis al evitar analizar los núcleos de ejecución y sus relojes, además de las velocidades de transmisión de forma específica. Esto se debe a que los FLOPS, dependen de la velocidad del reloj de los procesadores (Hz), que definen los ciclos de ejecución de instrucciones, así como de las propias operaciones en coma flotante que



utilizan dichos ciclos. Debido a que existen diferentes operaciones con una utilización del procesador diferente (entre 1 y 24 ciclos), se establecen algoritmos específicos (un conjunto de operaciones concretas) para las comparativas entre máquinas. Como se puede observar, los MFLOPS ofrecen un valor común, sin necesidad de entrar en análisis específicos del hardware, solo son dependientes del algoritmo de análisis.

Para calcular la dimensión de nuestro problema, hay que analizar el tipo de problema y su correspondiente complejidad algorítmica. Se pueden distinguir dos problemas matemáticos independientes: seguimiento y simulación de movimiento del ingenio; optimización de rutas.

El primero supone un problema de complejidad lineal. La resolución de peticiones de usuarios y la entrada de datos suponen una carga de proceso despreciable en comparación con la simulación de movimiento, pero requerirá equipos independientes. La simulación en sí misma está acotada a la seguridad de circulación con tráfico. Por ejemplo, para un coche se fija su desplazamiento en 1 metro mientras que el tiempo que depende de la velocidad y el desplazamiento queda vinculado a la velocidad al estar el desplazamiento fijado. Así se podrían establecer diferentes acotaciones: velocidad del sonido ~ 340 m/s, o una acotación más ajustada 200 km/h (~ 55 m/s). Esto supone respectivamente bloques de tiempo de 3 ms y 18 ms, donde cada ingenio necesita ejecutar un algoritmo de cálculo de tiempo, velocidad inicial, y velocidad final cuya carga de trabajo se puede resumir en aproximadamente 300 operaciones, que supondrían aproximadamente 1.100 ciclos, que se deben repetir por cada bloque de tiempo. Dada la diferencia de número de ciclos entre operaciones y en la búsqueda de los valores límite, se ha aplicado el máximo de número de ciclos en todas las operaciones. Siguiendo con los valores límite, se analiza la velocidad del sonido para los ingenios, esto supone repetir 340 veces dicho algoritmo en un segundo o lo que es lo mismo se tiene $1/340$ de segundo ($\sim 2,9$ ms) para ejecutar el algoritmo de un ingenio. Por tanto, tenemos que un ingenio necesita 1.100 ciclos (374.000 ciclos en un segundo) lo que supone 0,374 MFLOPs por ingenio. Así los 30 millones de ingenios consumirían 11.220 TFLOPs. Aunque el análisis de carga de proceso en MFLOPs es correcto, la dimensión real crece por razones de seguridad y control de errores, así se debe multiplicar al menos por 3, en base a una redundancia mínima que permita la detección de errores en un proceso. También, se debe asegurar un volumen de ciclos libres en los núcleos de procesamiento, que eviten errores en cascada, aunque esto no afecta a la carga de proceso si lo hace en el volumen de computadores, al tener que limitar la asignación de ingenios por núcleo de ejecución. Se debe tener en cuenta que esta situación se supone límite, dado que se han aplicado datos extremos como la cota mínima de desplazamiento y la velocidad límite máxima, por tanto, es esperable una reducción considerable de la carga de trabajo total. Por otra parte, las peticiones entrantes de usuarios, verificación de credenciales, y entrada de datos, para el caso de 30 millones de vehículos, supone un mínimo de 30 millones de usuarios, cuyo tratamiento independiente requiere de tiempo de procesamiento. En el peor de los casos puede haber 30 millones de peticiones simultáneas, y dado que un sistema convencional proporciona una capacidad de 10.000 peticiones simultáneas con equipos de 2 MFLOPs se puede establecer 100 MFLOPs como capacidad máxima de cómputo, aunque es improbable que se alcance.

En el caso de la optimización de rutas, matemáticamente supone un problema de complejidad exponencial. La herramienta aplicable en este caso, inteligencia artificial, proporciona soluciones de complejidad polinómica matricial, dado que se parte de un estado de rutas completo con las rutas óptimas para un solo vehículo. Aunque



aparentemente el problema exponencial del cálculo se haya transformado en operaciones matriciales, estas son de alta complejidad. A partir de aquí hay que aplicar herramientas de hardware específico cuyas características permitan la concurrencia de cada elemento matricial. Los sistemas de supercomputación basados en procesos gráficos con tarjetas gráficas son idóneos para esta situación, dado que ofrecen miles de núcleos de ejecución, limitados a unas operaciones en coma flotante, muy simples y concretas, que se ajustan a las operaciones de los elementos de las matrices. La problemática de la dimensionalidad es que el algoritmo que produce internamente la inteligencia artificial es desconocido, lo que obliga a realizar una estimación en base a los valores esperados. Así pues, si se establece una acotación de complejidad al polinomio en $O(n^2)$, para 30 millones de rutas supondría unos 900 TFLOPs.

5.1.3.1.3. Sistema de computación distribuida

Los sistemas de cómputo actualmente trabajan mediante operaciones de paralelización de trabajo, mediante diferentes técnicas de distribución. Así, un simple computador dispone de mecanismos para realizar paralelización. Dichos mecanismos comenzaron a aparecer en el año 2000 con el aumento del tamaño de las palabras (instrucción de procesador) y la aparición de la plataforma de procesadores de 64 bits, que se incrementó rápidamente a 128 bits para la concurrencia pura entre procesos (ejecución simultánea). A partir de ahí se potencia la paralelización a través de los conceptos de núcleo de procesamiento y procesos multihilo, donde un único procesador pasa a poder realizar procesos simultáneos que, dependiendo del programa, del tipo de cómputo, y principalmente de la interdependencia entre datos, podrían requerir comunicación entre los procesos concurrentes. Dicha comunicación se traduce en el aprovechamiento de la memoria compartida entre procesos, quedando limitado el procesamiento a la escala física del computador.

La escalabilidad de cómputo pasa por la agrupación de computadores y la comunicación de los procesos entre diferentes máquinas, postulando el clúster de computadores como la mejor forma de procesamiento paralelo al garantizar escalabilidad en hardware. Los clústeres, al principio, utilizaron un sistema de comunicación entre máquinas denominado en *Grid*, consistente en conexiones de red LAN de máquinas normales. La especialización de los mismos y las mejoras de los sistemas de computación y de comunicación fijan la necesidad de la proximidad entre las máquinas de un clúster, surgiendo el concepto del centro de datos.

Las tecnologías existentes con capacidad para gestionar la distribución de procesos o tareas (*jobs*) están relacionadas con lenguajes de programación específicos, y en algunos casos incluso a hardware como Hadoop. Algunas de estas tecnologías son las siguientes:

- Hadoop (Java), arquitectura que proporciona un soporte físico (disco) y un entorno de ejecución común, a partir de los elementos compartidos de cada máquina en un clúster.
- Spark (Python), arquitectura que proporciona un sistema de cómputo (núcleos de procesamiento y RAM) y un entorno de ejecución común, derivado del hardware compartido por cada máquina de un clúster.
- MPI (C o C++), arquitectura que proporciona enlace a las máquinas de un clúster, que mediante librería permite la ejecución de un proceso o una parte del mismo.



- Cuda (C++) (tarjetas gráficas Nvidia), programa/lenguaje basado en C++ y que trabaja con programas en C++ para utilizar la memoria de las tarjetas gráficas y sus núcleos de proceso para las operaciones que permitan cálculos simultáneos.

5.1.3.1.4. Organización y jerarquía

La existencia de varios Centros de Procesamiento de Datos implica la generación de una organización operacional, que determine la distribución de las tareas que se realizarán en cada uno de ellos, así como aquellos procesos que realizarán de manera conjunta, actuando como un único CPD.

Por una parte, la actividad del procesamiento conjunto se centrará en el desempeño de las tareas más críticas y las que requieran mayor capacidad computacional. Un ejemplo es el sistema de cálculo y gestión de rutas en tiempo real. Por otra parte, la actividad de procesamiento individual en los CPD se centrará en aquellas tareas que requieran una menor capacidad computacional y en aquellas que no sean críticas.

La organización operacional ha de incluir los protocolos en caso de emergencia, fallo del sistema, caída del sistema o ataque al CPD. En la situación en la que un CPD viese comprometida su operatividad por cualquiera de los anteriores motivos, la estructura de administración del sistema de gestión automatizada del tráfico ha de distribuir las tareas al resto de CPD que sigan operativos, durante el tiempo que se necesite para recuperar la operatividad del sistema.

5.1.3.2. Salas de Control de Tráfico

Las Salas de Control de Tráfico (SCT) son la parte de la infraestructura, que, junto a los CPD, conforman los Centros de Control de Tráfico. Una SCT es un espacio diseñado para que las personas interactúen con el sistema de gestión del tráfico en diferentes tareas y actividades administrativas o de gestión. En cierto modo, es la parte que se asemeja a los centros de control convencionales.

Una Sala de Control de Tráfico es un espacio formado por una serie de computadores, necesarios para la ejecución de las diferentes tareas que allí se realizan; un conjunto de monitores y sistemas de visualización del tráfico, que permiten a las personas realizar las tareas de gestión que les corresponden; el sistema de conexión con el CPD correspondiente, esencial para garantizar la operatividad y seguridad del sistema de gestión del tráfico; y los puestos y equipamiento que necesitan las personas para la realización de sus tareas.

Las personas que se encuentran en una SCT tienen roles muy diversos, como pueden ser técnicos de tráfico de un ayuntamiento, autoridades civiles, cuerpos y fuerzas de seguridad, técnicos de mantenimiento del sistema, autoridades judiciales, operarios de servicios de emergencias, etc. La estructura administrativa (analizada en el capítulo 6), en la que se descomponga finalmente el sistema de transporte automatizado, será la que determine con precisión todos los roles de personas que participarán activamente en la gestión del tráfico.

El número de SCT que serán necesarias, nuevamente, dependerá de la estructura administrativa del sistema de transporte automatizado. La cantidad de SCT será muy



superior al número de CPD que haya. La distribución lógica será desarrollar una SCT en cada lugar donde haya una administración con competencias de tráfico en una determinada región. Es lógico pensar en una gran SCT para el Gobierno de la Nación, al igual que en una SCT para el Ministerio de Defensa. De la misma forma, las diferentes comunidades autónomas tendrán las suyas. Ocurre lo mismo con los grandes ayuntamientos, con competencias de gestión del tráfico en sus calles. Sin embargo, no parece un planteamiento adecuado, ni en términos operacionales ni económicos, pensar en una SCT para ayuntamientos pequeños.

En las Salas de Control de Tráfico será desde donde las diferentes autoridades ejecutarán los atributos y competencias que tengan asignados, como puede ser la planificación del tráfico o la intervención de ingenios mediante el Tercero Autorizado. El conjunto de tareas que realizarán las personas presentes en las SCT son tareas de alto nivel, siendo el propio sistema de gestión automatizada del tráfico el que ejecutará los procesos de computación y comunicación necesarios para que se ejecuten adecuadamente. En definitiva, estos operarios trabajarán a través de un interfaz para dar órdenes al sistema y a los ingenios.

5.1.4. Estructura de gestión

El diseño de una infraestructura de las características de los Centros de Control de Tráfico es una tarea crítica para su correcto funcionamiento. El primer paso es el diseño conceptual de la arquitectura genérica del sistema y de los procesos asociados a sus funcionalidades y requisitos principales.

5.1.4.1. Arquitectura genérica del CCT

La conceptualización de la arquitectura del Centro de Control de Tráfico (CCT) implica establecer las relaciones fundamentales con los elementos o agentes externos al propio CCT, pero que tienen un papel imprescindible en la movilidad automatizada. Estos elementos externos son, por un lado, los diferentes ingenios, sean terrestres, aéreos o marinos, y, por otro lado, la Red de Comunicaciones que se encargará de garantizar las comunicaciones entre el CCT y los ingenios. Además, tendrán un rol destacado los propietarios de los ingenios o los operadores de flotas, al igual que los usuarios finales, tanto en el transporte de personas como en el transporte de mercancías. La arquitectura genérica se presenta en la Figura 5. 4.

El corazón del Centro de Control de Tráfico es el Centro de Procesamiento de Datos, donde se realizarán y ejecutarán la inmensa mayoría de procesos asociados a la gestión automatizada del tráfico. Los principales elementos del CPD son:

- **Servicios.** El área de servicios, constituido por un bloque de sistemas servidor, se encarga de la recepción y respuesta de las entradas externas, para comunicaciones síncronas desde la Red S3 o Internet, proporcionando una recepción masiva que soporte la simultaneidad de un gran número de entradas. Para esta gestión se asigna un módulo de cómputo que se encargará de la resolución del mensaje recibido, mientras se proporciona la respuesta de confirmación de la recepción al emisor origen, permitiendo continuar con el tratamiento de las siguientes entradas, mientras se realizan las acciones solicitadas en el módulo de cómputo. Esta gestión

requiere guardar la información de identificación de la comunicación, para proporcionar la resolución del módulo cuando termine.

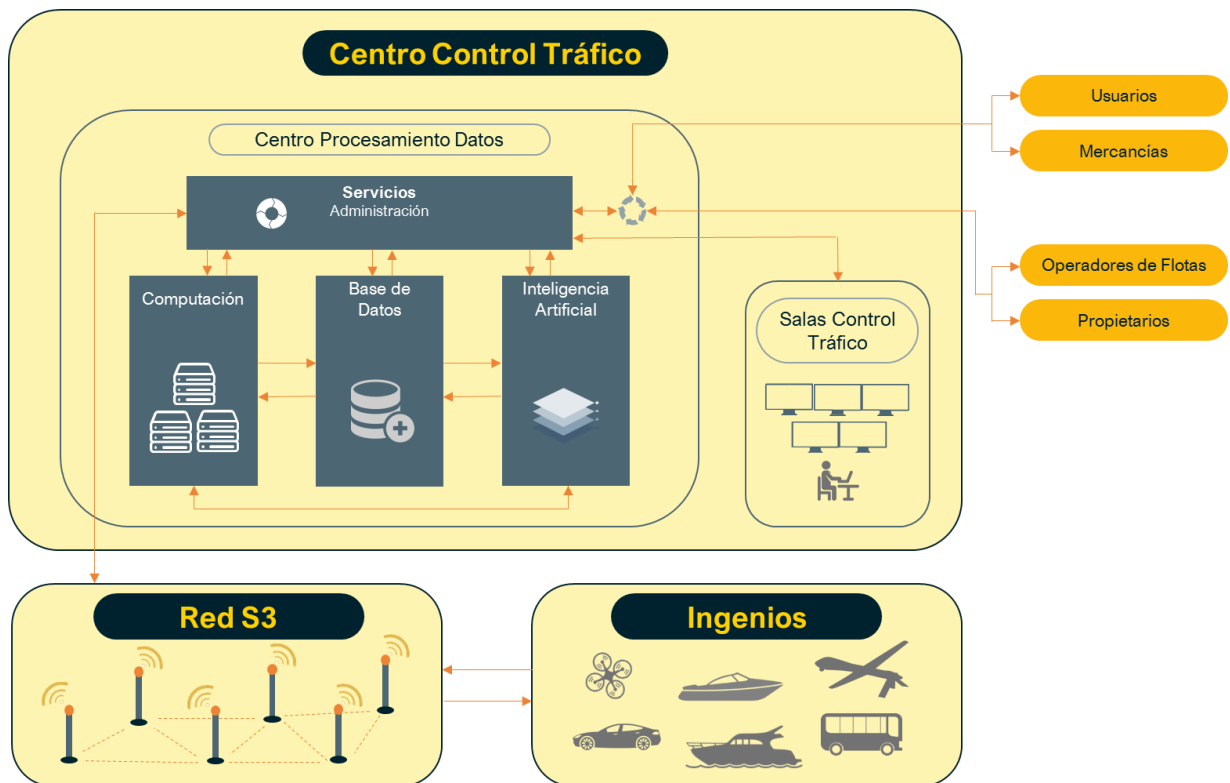


Figura 5. 4. Arquitectura genérica del Centro de Control de Tráfico (CCT).

- **Computación.** El área de computación está constituido por un bloque mixto de sistemas servidor y sistemas de cómputo. Entre ambos se encargan de soportar el flujo de tráfico en tiempo real, a partir de la virtualización del entorno de circulación y la información de simulación y seguimiento de los ingenios. En este último caso se establece un servicio de comunicación continua (*streaming*) asíncrona “peer to peer”, entre el módulo de cómputo de un ingenio y el ingenio. De forma análoga, el sistema de simulación hace lo propio con los Centros de Control de Tráfico, incluyendo, además del entorno de circulación, la información más relevante de los ingenios. De una forma más limitada también se conectan la información de ingenios a las aplicaciones de clientes y propietarios de ingenios. Esto permite la transmisión de los cambios y las órdenes asociadas al sistema, en tiempo real, entre todos los actores involucrados.
- **Base de Datos.** El área de base de datos se compone de múltiples sistemas de servidores dedicados, con una alta capacidad de almacenamiento físico para datos, prestando servicios independientes. Si bien las tareas principales son el respaldo de todos los sistemas, y la gestión de usuarios acreditados (ciberseguridad), también soporta el direccionamiento distribuido de la carga de trabajo, en los sistemas de cómputo y entre los sistemas de servicios y los de cómputo, guardando la información de identificación de comunicación, proceso y direccionamiento de la asignación de procesos a núcleo de procesamiento.
- **Inteligencia Artificial.** El área de inteligencia artificial se compone de sistemas servidor asociados a sistemas de cómputo especiales, diseñados para operaciones matriciales (tarjetas gráficas). De forma cíclica aplicarán algoritmos de inteligencia



artificial para optimizar el conjunto de rutas de todos los ingenios, tomando el estado del flujo de tráfico y las rutas base para los destinos proporcionados por los usuarios y los destinos.

Las Salas de Control de Tráfico son la segunda componente destacada de los CCT, donde se encuentra el personal que forma parte de la gestión automatizada del tráfico, y están conectadas directamente con el área de servicios del CPD.

5.1.4.2. Procesos de la gestión automatizada del tráfico

La realización de un diseño detallado, de la totalidad de procesos que ha de desarrollar un CCT, para la ejecución de una gestión automatizada del tráfico, representa un trabajo colosal, que supera el alcance de esta tesis, y se deberá realizar de manera específica como continuación de este diseño conceptual. En esta tesis doctoral se analizan y describen los principales procesos de la gestión automatizada del tráfico, sobre los cuales se ha de sustentar el diseño del sistema. Estos procesos son:

- Solicitud, gestión y asignación de rutas
- Modificación de rutas
- Emergencias

Los siguientes apartados contienen el desarrollo de estos procesos principales.

5.1.4.2.1. Solicitud, gestión y asignación de rutas

Una de las funcionalidades más importantes de la gestión automatizada del tráfico es la planificación y gestión de rutas. La centralización de este proceso en un mismo ente es lo que permite la optimización del conjunto de flujos de tráfico. En este apartado se describe la arquitectura de este proceso dentro del Centro de Control de Tráfico.

El primer paso es la identificación de los agentes involucrados en el proceso:

- Ingenio o ingenios: su función principal es la ejecución de las rutas, es decir, la realización de los desplazamientos desde un origen hasta un destino. En este modelo de sistema de transporte automatizado, el rol del ingenio, desde el punto de vista de las rutas, será el del cálculo de rutas locales dentro del entorno de navegación, cediendo la función del cálculo de la ruta global al CCT. La descripción del funcionamiento interno del sistema autónomo de los ingenios se realiza en el apartado 5.2. En el análisis de este proceso, el ingenio actuará como receptor de la ruta proporcionada por el CCT.
- Red S3: se encarga de establecer la conexión entre los diferentes ingenios y el CCT, garantizando las comunicaciones en todo momento. La descripción de su funcionamiento se realiza en el apartado 5.3. En este proceso se analizará únicamente como medio de transmisión de la información.
- Usuario u Operador: en este concepto se agrupa el conjunto de posibilidades existentes en cuanto a las personas que requieren los servicios de movilidad. Están incluidos los propietarios particulares de ingenios, los operadores de flotas de ingenios y los usuarios finales que únicamente contraten un servicio de movilidad. Incluye tanto el transporte de personas como el transporte de mercancías, ya que



el proceso es el mismo. El rol principal de este conjunto de agentes en este proceso es de realizar la solicitud de la ruta deseada.

- Centro de Control del Tráfico: encargado de la gestión, cálculo y asignación de rutas, tal y como se ha descrito en los apartados anteriores.

Una vez se han identificado los diferentes agentes que participan de manera activa, se puede desarrollar el proceso. La arquitectura del proceso se muestra en la Figura 5. Resulta evidente que dicho proceso se inicia en el momento que el usuario/operador realiza una solicitud de ruta. Esta solicitud ha de incluir dos datos fundamentales, el origen y el destino del trayecto que se desea realizar. En el caso de propietarios u operadores de flotas, las solicitudes estarán asignadas a ingenios concretos, en cambio, en el caso de usuarios, en la gran mayoría de casos, no llevarán asignado un ingenio concreto. Además, la solicitud podrá incluir una serie de parámetros o requisitos específicos en función del tipo de trayecto a realizar o el servicio contratado, como pueden ser la realización de paradas intermedias o el transporte de mercancías peligrosas, entre otros muchos. Una vez se ha realizado la solicitud por parte del usuario/operador, con toda la información necesaria, ésta se envía al Centro de Control de Tráfico.

La solicitud de ruta llega al área de servicios del CCT, concretamente al módulo de despacho de solicitud. Este módulo se encargará de analizar la solicitud y comenzar la gestión de la misma. El siguiente paso será su envío al área de computación, llegando al módulo de procesamiento de usuarios, encargado del análisis del agente que ha realizado dicha solicitud. A continuación, pasará al módulo de petición de usuario, que se comunicará con la base de datos, para comprobar los datos del usuario que ha realizado la solicitud. En el caso de que dicha solicitud llevase un ingenio concreto asociado, se realizará también una comprobación en la base de datos del ingenio en cuestión. En caso de no tener un ingenio asociado, se identificará este hecho, notificando la necesidad de asignación posterior de ingenio. Realizadas las comprobaciones pertinentes con la base de datos, el módulo de petición de usuario determinará si la solicitud es apropiada o no, y en caso negativo denegará la solicitud. En caso positivo, se procederá a la validación de usuario. Una vez se ha validado la solicitud, esta será enviada al cálculo de flujos de tráfico, un proceso que se ejecuta de manera continua dentro del área de computación. El cálculo de flujos de tráfico tiene la función de estar calculando y actualizando de manera constante rutas para el conjunto de ingenios. Este cálculo de flujos de tráfico se respalda en la base de datos. Una vez la solicitud llega a este punto, será donde se realiza el cálculo de una ruta inicial para dicha solicitud, obtenida por el cálculo de flujos de tráfico, dentro del área de computación. Obtenida esta ruta inicial, será enviada al área de inteligencia artificial.

En el área de inteligencia artificial se está realizando de manera continua una simulación del conjunto de flujos de rutas. Esta simulación se respalda en la base de datos de manera constante, al igual que ocurría con la computación de flujos de tráfico. En el momento que el área de computación envía la ruta inicial asignada a la solicitud, ésta se incorpora a la simulación de flujos de rutas. La incorporación de la ruta afectará a rutas ya existentes, y por lo tanto implicará modificaciones en las mismas. El siguiente paso será el recálculo de flujos de rutas en base a esta nueva incorporación. Realizado este nuevo cálculo, será necesario actualizar los flujos de rutas. En este punto, una vez se han actualizado el conjunto de flujos de rutas, se ejecutará la optimización de flujos de rutas. Esta optimización es el objetivo final del área de inteligencia artificial, cuya misión es lograr la eficiencia del conjunto del tráfico.

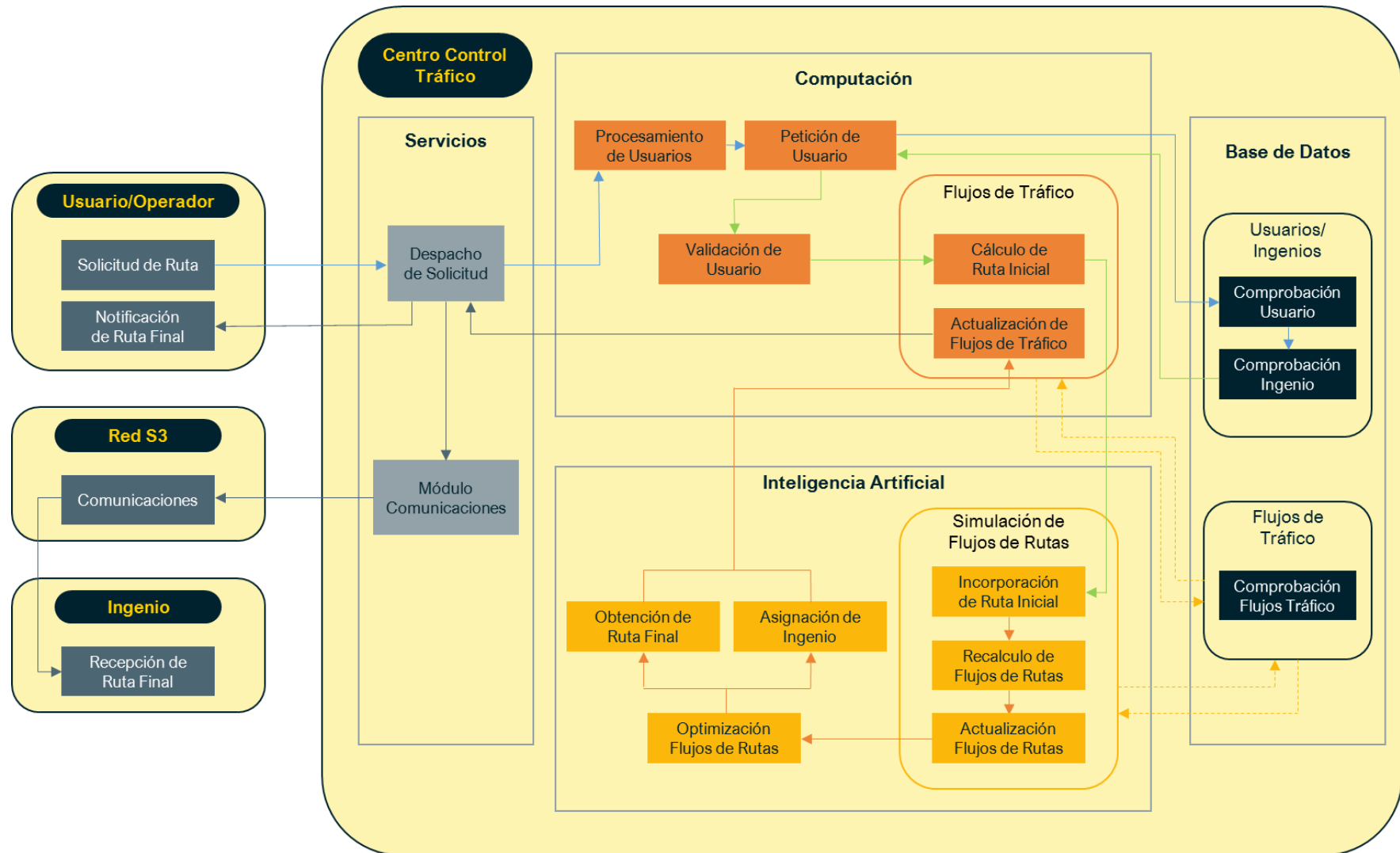


Figura 5. 5. Arquitectura del proceso de solicitud, gestión y asignación de rutas por parte del Centro de Control de Tráfico.



Cuando se ha optimizado el conjunto de flujos de rutas, se obtiene la ruta final para la solicitud realizada. Este proceso de optimización podría implicar la modificación de rutas existentes ya asignadas, este supuesto se analiza en el siguiente apartado 5.1.4.2.2. Concluida la optimización, se obtiene la ruta final de la solicitud, y en el supuesto en el que dicha solicitud no tuviese un ingenio asociado, se obtiene también la asignación de ingenio a la ruta solicitada. Estos datos son enviados nuevamente al área de computación.

En el área de computación se recibe la ruta final de la solicitud, con todas sus características, y se incorpora al cálculo de flujos de tráfico, procediendo a la actualización de dichos flujos de tráfico. Una vez se ha realizado este procedimiento, el área de computación envía la ruta final al área de servicios, llegando nuevamente al módulo de despacho de solicitud. En este punto, el módulo de despacho de solicitud realiza dos tareas principales. Por un lado, comunica al usuario/operador la ruta final que se ha asignado a su solicitud. Por otro lado, ha de enviar dicha ruta final al ingenio, transmitiendo la información al módulo de comunicaciones de la propia área de servicios, que se encargará de establecer la comunicación mediante la Red S3, cuya función será crear el canal de comunicación necesario para que el ingenio reciba esta ruta final. De esta manera se completaría el proceso de solicitud, gestión y asignación de ruta.

5.1.4.2.2. Modificación de rutas

La consecución de la eficiencia en el tráfico implica la necesidad de una optimización constante en las rutas que se están realizando, en base a las nuevas entradas del sistema o las alteraciones que se puedan producir en la ejecución de las diferentes rutas. Por lo tanto, la modificación de rutas es otro de los procesos clave que ha de ejecutar la gestión automatizada del tráfico.

Los agentes que intervienen en este proceso son los mismos que en el caso descrito en el apartado anterior, los usuarios/operadores, la Red S3, los ingenios y el CCT. Este proceso toma como punto de partida el anterior, es decir, una situación en la que ya se ha obtenido una ruta final y se está ejecutando, y en algún punto se debe realizar una modificación sobre dicha ruta. La arquitectura del proceso está explicada en la Figura 5. 6. Por lo tanto, el primer paso es identificar las situaciones, motivos o agentes que pueden requerir una modificación de ruta. Son los siguientes:

1. Ingenio: El ingenio es el responsable de la generación de trayectorias a lo largo de la ruta establecida, así como de todas las decisiones de navegación a corto plazo. En el supuesto de que detecte una situación inesperada, por ejemplo, una vía cortada o un accidente, que le haga modificar su ruta, se lo comunicará al CCT. El proceso se iniciaría en el sistema de generación de rutas locales del ingenio (siguiendo el camino rojo en la Figura 5. 6), que enviará la solicitud de cambio de ruta a través de la Red S3 al CCT. Esta solicitud llegará al área de servicios del CCT, en concreto al módulo de comunicaciones, que se la enviará al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas. Una vez tramitada esta solicitud, será enviada al área de computación, donde en primer lugar será tratada por el módulo de justificación de cambio de ruta, con el objetivo de identificar la razón de dicho cambio. Una vez identificada, por un lado, se enviará un mensaje nuevamente al área de servicios, esta vez al módulo de Salas de Control de Tráfico, que a su vez se lo transmitirá a la Sala de Control de Tráfico correspondiente, informando de que



- se va a producir un cambio de ruta. Por otro lado, se enviará al cálculo de flujos de tráfico del área de computación, en esta circunstancia, para el cálculo de una nueva ruta inicial individual. Obtenida esta nueva ruta inicial, se envía al área de inteligencia artificial, a la simulación de flujos de rutas. Se procede a la incorporación de esta nueva ruta, a continuación, se ejecuta el recalcular de los flujos de rutas, para posteriormente realizar la actualización de los flujos de rutas. En este punto, el área de inteligencia artificial se encarga de la optimización del conjunto de flujos de rutas, obteniendo una nueva ruta final. Esta ruta final se envía de nuevo al cálculo de flujos de tráfico del área de computación, para proceder a la actualización de los flujos de tráfico. Seguidamente se envía dicha ruta al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas del área de servicios. Este módulo dará dos salidas, una notificación de la nueva ruta final al usuario/operador de dicho ingenio, y el envío de la ruta final al módulo de comunicaciones del área de servicios, que a su vez se lo trasladará al ingenio mediante la Red S3. De esta forma se completaría el proceso de modificación de ruta solicitada por el ingenio.
2. Usuario/Operador: Tanto los usuarios de los ingenios como los operadores de flotas pueden realizar solicitudes de modificación de ruta por diferentes motivos. Este proceso lo comenzará el propio usuario u operador (siguiendo el camino verde en la Figura 5. 6). En este caso la solicitud es enviada al módulo de despacho de solicitudes del área de servicios del CCT, que a su vez se la trasladará al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas. A partir de este punto, el proceso es igual que el relativo a los ingenios. Dicho proceso terminará con la notificación al usuario u operador de la nueva ruta final solicitada y la recepción por parte del ingenio asociado de la misma.
 3. Red S3: Las características de la Red S3 la dotan de capacidades de detección del entorno, lo cual representa una gran virtud a la hora de la gestión del tráfico. En el supuesto de que la propia red detecte alguna anomalía, que pueda afectar al desarrollo del tráfico, como podrían ser circunstancias meteorológicas adversas, averías de la propia red, o un corte de vial, entre otros, emitirá una solicitud de modificación de rutas. Este proceso lo inicia la propia Red S3 (siguiendo el camino azul en la Figura 5. 6). Esta solicitud llegará directamente al módulo de comunicaciones del área de servicios del CCT, que se la enviará al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas. A partir de este punto, el proceso vuelve a ser prácticamente idéntico a los anteriores, con la única salvedad que en este caso las modificaciones afectarán al cálculo de las rutas de varios ingenios, siendo por tanto un proceso de modificación de rutas colectivo. El proceso concluirá con la recepción de las rutas finales por parte de los ingenios afectados y la notificación a sus respectivos usuarios y operadores.
 4. Autoridad: La autoridad se refiere a aquellas entidades e instituciones con algún tipo de competencia sobre el tráfico, que estarán presentes en las diferentes Salas de Control de Tráfico. Dentro de su ámbito de competencias, estas autoridades podrán solicitar la modificación de rutas de determinados ingenios, como puede ser, por ejemplo, el corte de una vía para la realización de obras o la programación de un desfile por el centro de la ciudad. Este proceso de modificación de rutas se comienza desde una SCT (siguiendo el camino amarillo en la Figura 5. 6). La SCT emitirá la solicitud de modificación de rutas, que llegará al módulo de despacho de Salas de Control de Tráfico del área de servicios del CCT, que a su vez enviará dicha solicitud al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas.



Nuevamente, en este punto el proceso es igual que en los casos anteriores. En este caso, dependiendo de la circunstancia por la que la autoridad solicite la modificación, podría ser una modificación de una ruta individual o una modificación de varias rutas. El proceso se dará por terminado cuando el ingenio o ingenios afectados reciban las nuevas rutas finales, y se proceda a la notificación de dichas rutas a sus usuarios y operadores.

5. Centro de Control de Tráfico: La competencia de gestión automatizada del tráfico recae sobre el CCT, y, por tanto, tendrá la capacidad de realizar modificaciones de rutas ya existentes. A lo largo de la explicación de los procesos anteriores se podría deducir la existencia de este proceso, así como su arquitectura. Es un proceso que se origina en el área de inteligencia artificial del CCT (siguiendo el camino morado en la Figura 5. 6). Concretamente en la ejecución de la optimización de los flujos de rutas. Tanto en la solicitud de nuevas rutas, como en las solicitudes de modificación de rutas existentes, el proceso de optimización de flujos de tráfico podrá afectar a otras rutas que bien se estén ejecutando o bien esté previsto que se realicen. Una vez se han obtenido las nuevas rutas finales, se envían al cálculo de flujos de tráfico del área de computación, para proceder a la actualización de flujos de tráfico. Seguidamente se trasladan estas nuevas rutas al módulo de despacho de eventos para la modificación de rutas del área de servicios del CCT. Y desde aquí, al igual que en los procesos anteriores, se envía por un lado las nuevas rutas a los ingenios que se vean afectados, y por otro lado la notificación a sus respectivos usuarios y operadores.

5.1.4.2.3. Emergencias

El devenir del tráfico en el día a día origina la aparición de diferentes situaciones de emergencia, que es fundamental integrar dentro de la gestión automatizada del tráfico. La tipología de emergencias que se pueden dar es muy amplia y variada, y puede involucrar a ingenios de policía, bomberos, ambulancias y la unidad militar de emergencias, entre otros. Este proceso está explicado en la Figura 5. 7, y es una combinación de los procesos de solicitud de ruta y modificación de ruta.

Los agentes involucrados en el proceso son los mismos que en los supuestos anteriores, los usuarios/operadores, los ingenios, la Red S3 y el CCT. El proceso de inicio de una situación de emergencia se puede originar tanto por un usuario u operador, como por la autoridad desde una Sala de Control de Tráfico.

El primer supuesto lo puede iniciar un usuario, como puede ser el caso de una patrulla de policía que detecta un comportamiento delictivo, o un operador, como puede ser una estación de bomberos que recibe el aviso de un incendio y tiene que desplazar X ingenios hasta el lugar del fuego con carácter urgente. El usuario y operador traslada la solicitud al módulo de servicios del CCT, llegando al módulo de despacho de solicitud. Este módulo trasladará la solicitud al área de computación, en concreto al módulo de procesamiento de usuarios que, una vez haya analizado la solicitud, la enviará al módulo de petición de usuario. Este módulo realizará las comprobaciones pertinentes con la base de datos, tanto del usuario como del ingenio o ingenios en cuestión, si los hubiera. Cuando se han realizado las comprobaciones, se procede a la validación de usuario, y se traslada la solicitud al cálculo de flujos de tráfico del área de computación.

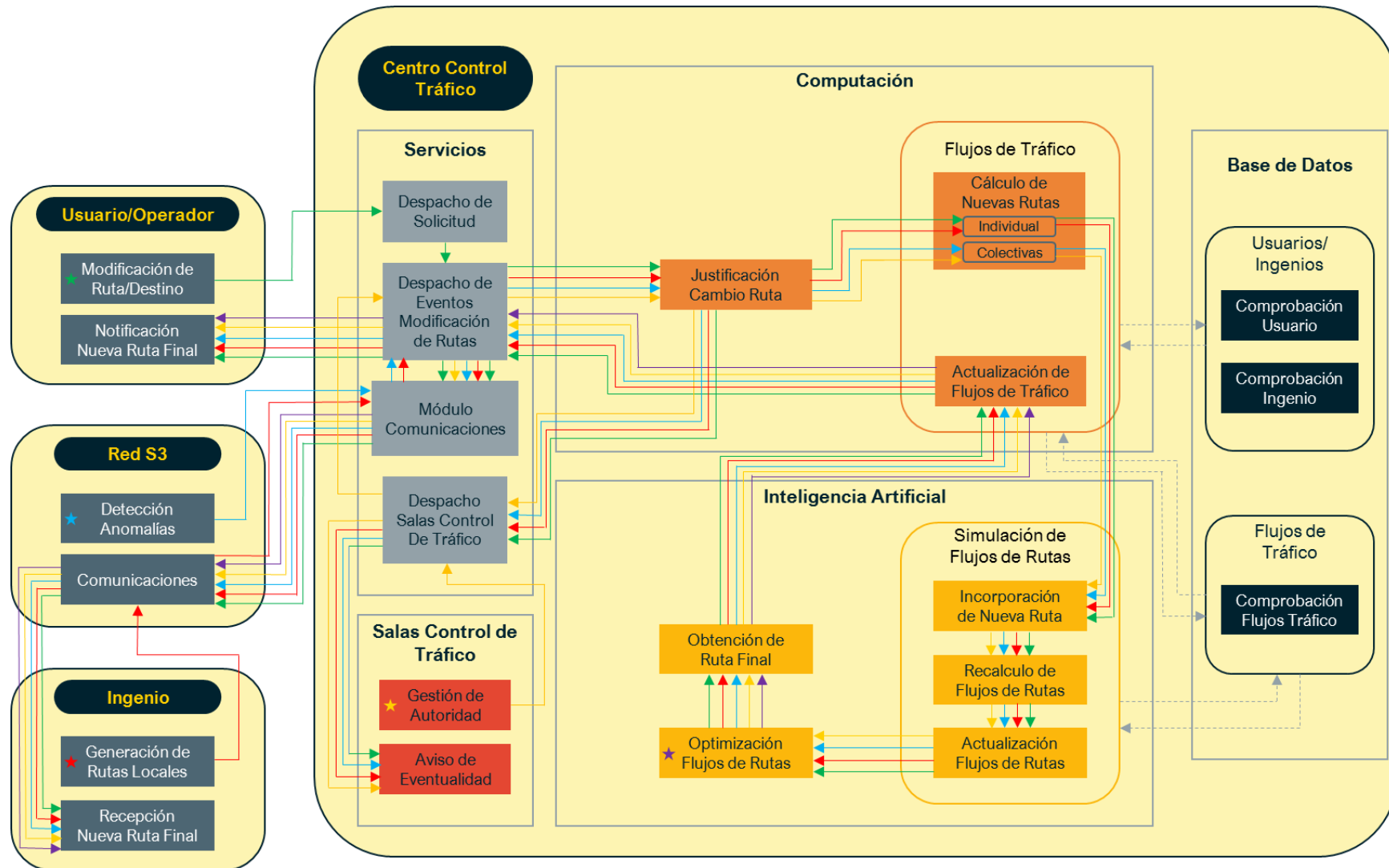


Figura 5. 6. Arquitectura del proceso de modificación de rutas por parte del Centro de Control de Tráfico.

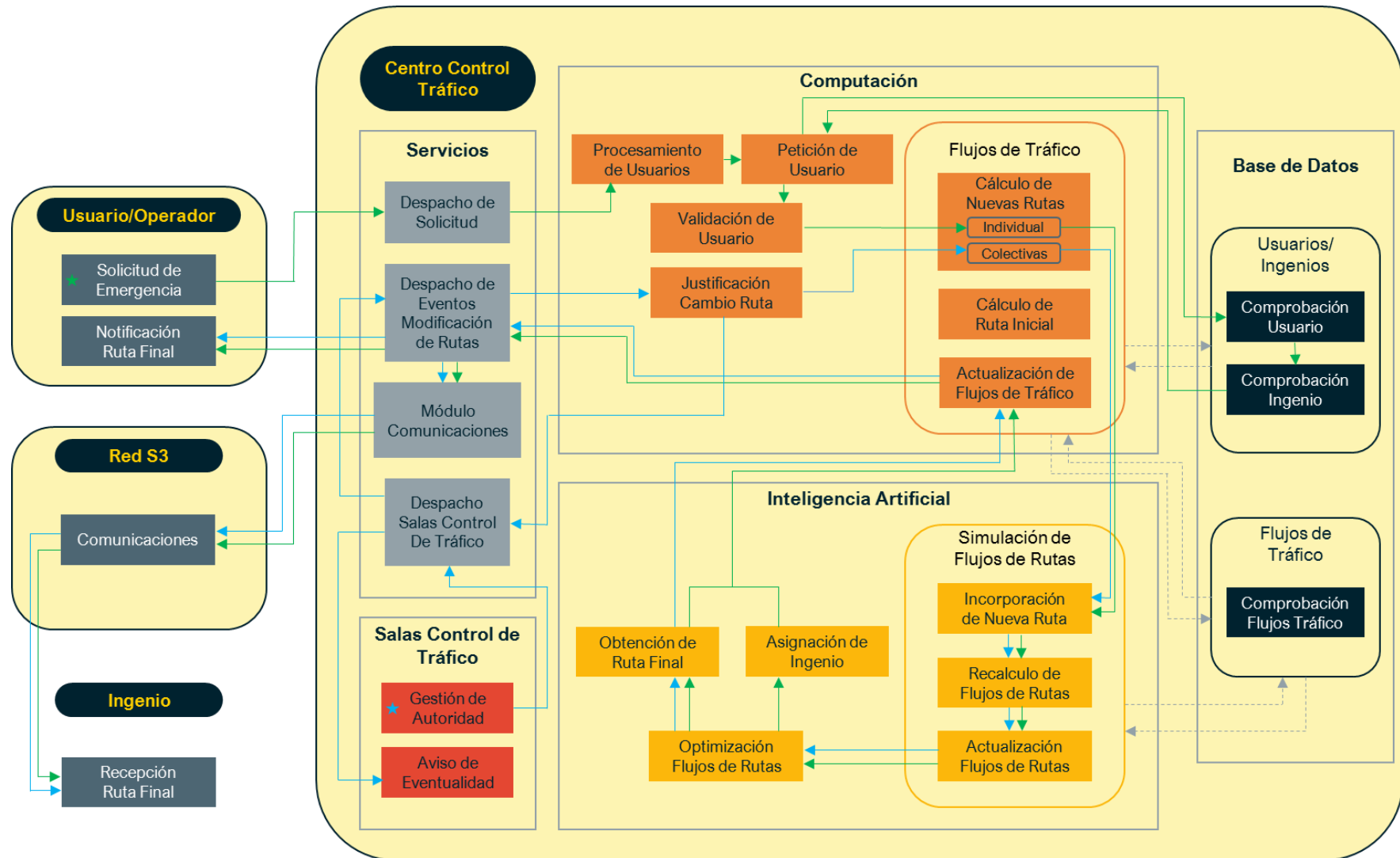


Figura 5. 7. Arquitectura del proceso de gestión de emergencias por el Centro de Control de Tráfico.



Aquí se calcula la nueva ruta y se envía al área de inteligencia artificial, a la simulación de flujos de rutas. Se incorpora la ruta a la simulación, se realiza el recalcular de los flujos de rutas y se procede a la actualización de los flujos de rutas. El siguiente paso es la optimización de dichos flujos, en este caso el criterio fundamental será la priorización de los ingenios de emergencia. Completada la optimización se obtiene la ruta final, y en el caso de que la solicitud no tuviese un ingenio asociado, se le asignará el ingenio en mejor disposición para realizar la misión de emergencias. A continuación, se envía esta información al cálculo de flujos de tráfico del área de computación, para realizar la actualización de flujos de tráfico. La ruta final es enviada al módulo de despacho de eventos y modificación de rutas que, al igual que en los procesos anteriores, se la envía al módulo de comunicaciones, para que llegue al ingenio a través de la Red S3 y se la notifique al usuario/operador.

El segundo supuesto, se ocasiona cuando la solicitud de emergencias, en vez de realizarse sobre el terreno por un usuario u operador, se realiza desde una Sala de Control de Tráfico, como podría ser la autorización de una operación policial o de una investigación judicial. En este supuesto, el proceso de gestión de emergencias es idéntico al cuarto proceso de modificación de rutas del apartado anterior, que daba comienzo en una SCT.

En ambos casos, las situaciones de emergencia se caracterizan por afectar en mayor o menor grado a las rutas del resto de ingenios que circulen por los mismos viales. Esta influencia puede ser mínima, del tipo: ceder el paso al ingenio de emergencias o dotarle de prioridad en una intersección, o de mayor calado, del tipo: tener que desviarse de vial para favorecer la realización de dicha situación de emergencia.



5.2. Ingenios Autónomos

En el sistema de transporte automatizado, la actividad propia de transportar, bien sea personas o mercancías, es realizada por los ingenios. De acuerdo a la definición expuesta con anterioridad en esta tesis, un ingenio es cualquier vehículo con capacidad de navegación autónoma, que puede desplazarse por sí mismo desde un origen hasta un destino sin ningún tipo de intervención humana, dotado con la capacidad de comunicación tanto con otros ingenios como con la infraestructura, es decir, la Red S3 y el CCT, empleando además tecnologías de propulsión sostenibles. Es una definición aplicable a los tres contextos, aéreo, terrestre y marino.

El análisis realizado en el apartado 4.2 de esta tesis comparaba las principales diferencias entre la automatización de un vehículo y la automatización del tráfico. Se llegó a la conclusión de que los vehículos completamente autónomos, según los marcos o estándares actuales de los diferentes medios, cumplían algunos requisitos necesarios para lograr la automatización del tráfico, pero no suficientes. Por eso surge la necesidad de generar, al menos, un nuevo nivel que establezca los requisitos que han de tener los ingenios en la automatización del tráfico. Como ya se indicó en el apartado 4.2 lo más apropiado será, en vez de añadir un nuevo nivel a los diferentes estándares, generar un nuevo marco para la automatización del tráfico. En este apartado se analizan los principales requisitos que tendrán los ingenios en este nuevo marco o estándar.

La concepción convencional de un vehículo autónomo, siguiendo la clasificación en niveles, establecida por la SAE (apartado 4.1.1), asigna al propio vehículo la ejecución completa de la tarea de la navegación autónoma. En el caso de la navegación autónoma aérea, tal y como se expuso en el apartado 4.1.2, la colaboración en determinadas actividades de la navegación autónoma, tanto con otras aeronaves como con la estación de control está muy presente en los diferentes niveles de autonomía. En el nivel 10 de autonomía se le atribuye a la aeronave la totalidad de competencias en cuanto a la navegación, pero sin realizar una clara especificación de las funciones que podría tener la estación de control. En el caso de la navegación autónoma marina, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 4.1.3, el marco donde se establecen sus características tiene un estado muy básico de desarrollo, y se le atribuye nuevamente la totalidad de competencias de navegación a la embarcación.

En el sistema de transporte automatizado, la gestión automatizada del tráfico pasa imprescindiblemente por asignar al Centro de Control de Tráfico el cálculo de la ruta óptima para los diferentes ingenios. De esta manera se puede conseguir la eficiencia global en el conjunto de flujos de tráfico. Este hecho tiene un papel muy relevante en el diseño del propio sistema autónomo de los ingenios.

Existen a su vez otras funciones del CCT, analizadas en el apartado 5.1.2, como es el control y monitorización de ingenios, la ordenación dinámica del tráfico, el Tercero Autorizado, el Triple Click o la gestión de preferencias, que afectan de manera directa a la actuación del ingenio durante la tarea de la navegación autónoma. El sistema autónomo del ingenio se ha de diseñar para poder interactuar de manera continuada con el CCT, y poder ejecutar las distintas órdenes y misiones que se le asignen, siempre y cuando no comprometan la seguridad del trayecto.



5.2.1. Sistema autónomo de los ingenios

Los ingenios son máquinas complejas formadas por un conjunto de diversos módulos interconectados. Entre ellos cabe destacar: el sistema de propulsión, el sistema de almacenamiento de energía, la estructura, los elementos mecánicos y el sistema autónomo. Además, la tipología de los ingenios tiene características muy diferentes de unos a otros, no solo por el medio en el que se desplacen, sino también por la misión para la que han sido diseñados. En poco se parecen las características de un pequeño dron, tipo multicóptero, para el transporte de paquetes a una aeronave de ala fija para el transporte de centenares de pasajeros. A pesar de las notables diferencias que puedan existir entre las diferentes clases de ingenios, en un sistema de transporte automatizado todos los ingenios han de tener una serie de características comunes.

En el ámbito del desarrollo de esta tesis tiene un papel relevante el sistema autónomo de los ingenios, que es donde estarán presentes las características comunes a todo ingenio. La misión del sistema autónomo de cualquier ingenio es guiar al propio ingenio a lo largo de la ruta, desde su origen a su destino, de manera segura. Ejerce la función de conductor, piloto o timonel, aprovechando las capacidades de procesamiento y computación de la electrónica para mejorar notablemente el comportamiento que tendría cualquier persona en su lugar.

El sistema autónomo genérico, común a cualquier ingenio, estará formado por una serie de elementos o subsistemas que realizarán las diferentes funciones para las que han sido diseñados, consiguiendo en conjunto ejecutar la misión principal. Son los siguientes:

1. Entorno de navegación.
2. Sensores.
3. Subsistema de posicionamiento.
4. Subsistema de comunicaciones.
5. Subsistema de percepción.
6. Subsistema de planificación.
7. Subsistema de control.
8. Subsistema de estado.

Se realiza a continuación un análisis de cada uno de estos elementos y subsistemas, fundamentales en cualquier sistema autónomo para la gestión de los ingenios en el transporte automatizado.

5.2.1.1. Entorno de navegación

Uno de los grandes retos de la navegación autónoma, en cualquier medio, es dotar al ingenio de la situación de conciencia de su entorno. Para alcanzar esta condición, el ingenio debe tener en todo momento identificados: su entorno, los diferentes elementos presentes en él, tanto estáticos como móviles, y las interacciones que podrían tener estos elementos con el propio ingenio a lo largo de su recorrido. Es una cuestión crítica resolver la interpretación que realiza el sistema autónomo del entorno por el que va a navegar.



Entendemos como navegar la acción de desplazarse desde un origen hasta un destino con un ingenio autónomo. El origen y el destino son lugares conocidos, la cuestión es cómo se llega de un punto a otro. Podría haber una única solución, una gran cantidad de ellas, o incluso podría no ser posible efectuar dicha ruta. Dado que el sistema autónomo reemplazará al conductor humano, es conveniente analizar el comportamiento que siguen las personas para efectuar la tarea de cómo llegar desde un origen a un destino con un vehículo, desde el punto de vista de la navegación o ruta a seguir.

El conductor conoce el lugar de origen donde comenzará el trayecto, al igual que ha de conocer el destino al que desea llegar, de lo contrario sería un viaje sin rumbo, supuesto que carece de interés en este análisis. El hecho de conocer ambos puntos es imprescindible para poder realizar el trayecto, pero no es suficiente, ya que el conductor necesita conocer qué ruta ha de tomar. Este conocimiento lo adquiere el conductor de dos formas posibles. La primera, mediante su conocimiento y experiencia previa, puesto que conoce las calles, carreteras o viales que conectan ambos puntos, o bien ha realizado en otras ocasiones dicho trayecto. Este primer supuesto es el que se aplica en la gran mayoría de los trayectos que se realizan hoy en día por los conductores humanos. La segunda, mediante un agente externo al conductor que le proporcione dicho conocimiento, como pueden ser las indicaciones y señales sobre los propios viales, un mapa físico que contiene las calles y carreteras de una determinada región, otra persona que conoce dicho entorno, como puede ser un copiloto o acompañante, o por último un asistente de GPS que guía al conductor en tiempo real. La conclusión que podemos extraer es que, de una u otra forma, las personas necesitamos un conocimiento previo sobre la ruta que queremos realizar con un vehículo.

La deducción más inmediata de este análisis es la necesidad que tendrá un ingenio autónomo de conocer el entorno o región por la que se desplazará. Es una condición imprescindible por tanto disponer de, al menos, un mapa en dos dimensiones que contenga el conjunto de viales de dicha región, para que la navegación autónoma sea posible.

La siguiente cuestión que se plantea son las características de dicho mapa o entorno, así como el nivel de detalle que ha de tener. En este apartado existe debate dentro de la comunidad científica que está investigando en el sector. Hay autores que sostienen que el ingenio autónomo no necesita conocer con antelación el entorno por el que debe navegar (a pesar de necesitar un mapa bidimensional). En cambio, la gran mayoría de autores abogan por la generación y utilización de entornos de navegación, que agrupen una cantidad de información detallada sobre el entorno de circulación, para que el ingenio autónomo tenga dicho conocimiento de forma previa. La diferencia entre ambas posturas radica en el tipo de sensores que emplea el vehículo autónomo, estando basados en las cámaras RGB los primeros, y en una combinación de LiDAR, cámaras RGB y otros, los segundos.

En el diseño del sistema de transporte automatizado, que se está realizando en esta tesis, se aboga por la segunda estrategia, la generación de entornos de navegación con un amplio nivel de detalle, particularizados a cada uno de los medios de transporte, para adaptarse a las diferentes necesidades que puedan tener ingenios terrestres, aéreos o marinos.

Los entornos de navegación se materializan en forma de mapas tridimensionales con toda la información necesaria para que los ingenios puedan navegar de forma segura. Esta



información se estructurará en varias capas que ofrecen una representación realista y precisa del entorno. Las capas de partida, cuya información del entorno es más relevante, son:

1. Capa de representación tridimensional del espacio en forma de nubes de puntos.
2. Capa de representación 3D de superficies, que ofrezca una visión simplificada de la capa anterior.
3. Capa de identificación de patrones de entorno, que permitirán la generación de reglas de navegación para los ingenios.
4. Capa de detección e identificación de elementos clave del entorno.
5. Capa de detección de marcas viales, carriles e intersecciones y las posibles conexiones entre estas.
6. Capa de predicción y configuración de las comunicaciones V2X, incluyendo la calidad de enlace e indicaciones sobre el nivel de cobertura en cada región.

Cada una de las capas requiere de la elaboración de herramientas de software y algoritmos específicos. El conjunto de estas capas da lugar al entorno de navegación estructurado. De este modo surge un nuevo concepto en el sector del transporte: la aparición de una nueva infraestructura digital, los entornos de navegación tridimensionales. Es esta nueva infraestructura digital la que posibilita a los ingenios alcanzar el objetivo de obtener una situación de conciencia real.

Debemos abordar las estrategias llevadas a cabo durante la generación o construcción de esta infraestructura digital, además de los procesos necesarios para la actualización, segmentación y distribución de mapas tridimensionales. La generación de los entornos de navegación se realizará utilizando los datos recopilados por vehículos equipados con sensores similares a los utilizados por los ingenios autónomos, dando lugar a la digitalización con un gran nivel de detalle del espacio de navegación y los viales existentes. La actualización de entornos de navegación se realizará durante el funcionamiento de ingenios autónomos que, de forma automática y transparente, identificarán las modificaciones del entorno de navegación respecto a los datos registrados y transmitirán esta información al CCT, donde se utilizará esta información para actualizar la base de datos de entornos de navegación. Tanto el almacenamiento como la distribución de entornos de navegación será competencia del Centro de Control de Tráfico, que centralizará la información y proporcionará porciones del entorno de navegación a los ingenios cuya ruta así lo requiera. De acuerdo a lo que se expone en el apartado 5.2.2 en la arquitectura y procesos del sistema autónomo, al comienzo de cada ruta, el CCT proporcionará a cada ingenio el entorno de navegación correspondiente a la ruta que el ingenio debe seguir, que contendrá toda la información necesaria para que pueda completar su misión.

5.2.1.1.1. Entornos terrestres de navegación

La generación de nubes de puntos tridimensionales que representen el entorno es una tarea compleja, que normalmente no tiene una única solución, si no que cada autor implementa su propia solución, adaptándose a sus propios vehículos o el tipo de entorno por el que pretende circular, para ajustarse lo más posible a una solución óptima en su caso.

Las técnicas de fusión de información de escaneos LiDAR habitualmente se identifican con el nombre de SLAM (*Simultaneous localization and mapping* / Localización y mapeado



simultáneos). SLAM es un tipo de sistema que engloba todas las técnicas necesarias para la generación de un mapa en el que el vehículo autónomo pueda posicionarse [141], [142]. Estas técnicas se pueden aplicar tanto para la realización de mapas bidimensionales [143] como tridimensionales [144], [145].

Dentro del grupo de técnicas empleadas en SLAM, una de las más famosas y utilizadas en la industria es aquella que utiliza sensores LiDAR como fuente de información de datos principal, denominando a esta LiDAR SLAM. LiDAR SLAM se basa en la generación de mapas 3D de alta resolución, a partir de los datos recopilados por un sensor [146], [147].

Los sensores LiDAR funcionan emitiendo haces de luz láser, que tras reflejarse en una superficie cercana regresan al sensor. Midiendo el intervalo de tiempo entre el envío y la recepción del pulso láser, el sensor es capaz de calcular la distancia que lo separa del objeto. Los sensores LiDAR más potentes disponen de hasta 128 láseres que giran 360° sobre su eje a una frecuencia de entre 5 y 20 Hz para generar hasta 9,6 Millones de puntos por segundo [148]–[150].

Los sistemas SLAM combinan la información de varias nubes de puntos, capturadas por un sensor LiDAR en varios instantes de tiempo y utilizan técnicas de optimización para alinear los puntos comunes de los escaneos LiDAR con el objetivo de fusionar la información en una única nube de puntos [151].

El reto para la generación óptima de los entornos terrestres de navegación está en la creación, en un solo proceso, de una nube de puntos que contenga la información recogida por varios vehículos en una zona de estudio, donde cada uno de estos vehículos dispone de varios sensores LiDAR. De esta forma se conseguirá la creación homogénea de esta infraestructura digital, y se podrán realizar las actualizaciones, segmentaciones y distribuciones en tiempo real, desde el CCT al conjunto de ingenios.

5.2.1.1.2. Entornos aéreos de navegación

Uno de los mayores atractivos que ha tenido siempre la aviación es la ventaja de la línea recta. El gran tamaño que tiene el espacio aéreo y la ausencia de elementos estáticos en él, ofrece un inmenso abanico de posibilidades a la hora de generar vías aéreas. Otra de las grandes ventajas es que no se necesita generar infraestructura aérea, las aerovías no requieren ningún tipo de obra física. La infraestructura digital que suponen los entornos de navegación, en cierto modo ya se ha usado durante mucho tiempo en la aviación.

Sin embargo, en las operaciones de aterrizaje y despegue sí que es necesario disponer de mapas tridimensionales con alto nivel de detalle, tanto para ingenios que requieran una pista de aterrizaje como para ingenios que despeguen y aterricen en vertical. Además, en el sistema de transporte automatizado tendrá un papel muy relevante la aviación de baja cota, por lo que será muy importante, también, disponer de un mapa tridimensional de la superficie terrestre. Gran parte de las operaciones que se realicen con ingenios aéreos, por ejemplo, el transporte de personas o mercancías, se desarrollarán en núcleos urbanos, donde por razones evidentes será crítico que estos ingenios tengan una información detallada del entorno en el que van a volar.

El uso de LiDAR en aeronaves para aplicaciones muy diversas se lleva empleando durante décadas. Tradicionalmente ninguna de estas aplicaciones ha estado relacionada con la



navegación de las propias aeronaves, que se han apoyado en los sistemas de posicionamiento global para las fases del vuelo en crucero, y en la red de radioayudas y sistemas que ofrecen apoyo en el aterrizaje y despegue de las aeronaves. Esta infraestructura está basada en el DME, ILS, NDB, DVOR/CVOR, GBAS, MCC, estaciones RIMS y una red de monitorización de prestaciones e interferencias GNSS.

Sin embargo, los recientes avances en el desarrollo tecnológico de los LiDAR, y su exponencial crecimiento en las técnicas SLAM, principalmente con la aplicación en el ámbito terrestre, han dado lugar a prometedores estudios científicos, tanto para la generación de entornos tridimensionales desde las propias aeronaves [152], como para la operación en autónomo de aeronaves, sin emplear los sistemas de posicionamiento global [153].

La generación de estos entornos tridimensionales de navegación para ingenios aéreos tendrá un papel fundamental en el futuro de la aviación. Una vez esté creada esta infraestructura, se podrán generar los viales o aerovías sobre el propio entorno de navegación.

5.2.1.1.3. Entornos marinos de navegación

Los entornos marinos tienen unas particularidades específicas. En los entornos marinos se busca la creación de mapas tridimensionales tanto superficiales como submarinos en las áreas donde se vaya a realizar la navegación autónoma.

El proceso de creación de mapas se dividirá en mapas cartográficos y mapas batimétricos, que representen respectivamente las características del entorno sobre y bajo el nivel del mar. La combinación de ambos tipos de mapas proporcionará una visión completa del entorno de navegación, permitiendo actuar de forma preventiva ante cambios en el nivel de las aguas. El sistema será de aplicación, tanto para la navegación de cabotaje en aguas poco profundas, como en la navegación de masas de aguas estáticas, como lagos o embalses. En ambos casos será necesario controlar de forma precisa la posición relativa de la embarcación, respecto a su entorno y el relieve submarino.

Mapas batimétricos. Son mapas 3D de representación del relieve subacuático. Permitirán conocer la profundidad del fondo del mar o la masa de agua estática, su relieve y la existencia de elementos artificiales como bloques de lastre, boyas submarinas, cables y tuberías submarinas, etc. El mapa batimétrico permitirá identificar las zonas en las que está permitida la navegación, en función del calado de la embarcación. Se trata de un mapa dinámico que tiene en cuenta el oleaje en escenarios marinos y los cambios de nivel en lagos y embalses. Las tecnologías convencionalmente empleadas para generar este tipo de mapas han sido las basadas en radar y sonar [154], [155], aunque se están explorando nuevos métodos, algunos basados en LiDAR [156].

Mapas de superficie. Son mapas 3D de representación de aquellos elementos que se encuentran sobre el nivel del agua. Permitirán el registro y la identificación de todos los elementos que se encuentren en la superficie del agua, por ejemplo, boyas, muelles y embarcaderos, pilares, etc., así como la identificación de la línea de costa. El mapa podrá contener, además, indicaciones sobre la posición de faros, rutas de navegación, rampas de acceso desde tierra, zonas de embarque o cualquier otro elemento relevante para la



navegación segura de los ingenios. Estos mapas, se realizarán nuevamente con la tecnología LiDAR a través de las técnicas SLAM [157], [158].

La generación del entorno de navegación marino debe integrar ambos tipos de mapas para facilitar a los ingenios la interpretación del entorno en el que se desplazan. Se han desarrollado investigaciones en este sentido que demuestran la viabilidad del reto [159]. Resultando de gran interés en la navegación de cabotaje y en las operaciones portuarias que tengan que realizar los ingenios marinos.

Los medios y tecnologías disponibles en estos momentos permiten afrontar el reto de generar un entorno de navegación homogéneo a nivel nacional, de aplicación a los medios terrestre, aéreo y marino. La existencia de un Centro de Control de Tráfico que se encargue de la gestión, actualización y segmentación de dicho entorno representa una solución ideal para uno de los grandes retos que se ha planteado en la navegación autónoma. De esta forma el CCT se encargará de la fusión de los diferentes tipos de mapas en las zonas de unión o zonas compartidas para la navegación de los diferentes medios. La intermodalidad tendrá una importancia enorme en la movilidad autónoma, por lo que la existencia de esta infraestructura digital, transversal y compatible con los tres modos de transporte, es estratégica.

5.2.1.2. Sensores

Los sensores son los elementos del ingenio autónomo que captan la energía que emite o rebota el entorno. Son los dispositivos que recolectan la información del entorno próximo al ingenio. Se pueden agrupar en dos categorías:

- Sensores de captación externa: Son aquellos que proporcionan magnitudes físicas del exterior del ingenio.
- Sensores de captación interna: Son aquellos que proporcionan magnitudes físicas de los diferentes elementos y componentes del ingenio.

El área de los sensores es uno de los campos donde es más complejo hacer un modelo genérico para cualquier ingenio, debido a las notables diferencias que habrá tanto en el tipo de sensores empleados, como en su cantidad. Dependiendo del medio de desplazamiento, el tipo de misión para la que haya sido diseñado el ingenio y el tamaño y características del mismo, se utilizará una tipología y configuración de sensores diferentes.

En el marco del sistema autónomo, los sensores se encargan única y exclusivamente de la recolección de datos. El tratamiento y análisis de esos datos es función del subsistema de percepción.

5.2.1.3. Subsistema de posicionamiento

En la estrategia de navegar con entornos de navegación muy detallados, la siguiente cuestión es el desafío de la exactitud en la localización. Nuevamente, conviene analizar el comportamiento del conductor humano para resolver este reto. Los entornos de circulación de vehículos son, en el sector terrestre, calles y carreteras de unas dimensiones



determinadas, con un ancho medio aproximado de 3,5 m, teniendo un ancho promedio de vehículo entre 1,8 m y 2 m, lo cual deja los márgenes promedio en torno a 0,75 m a los lados del vehículo, siendo en algunos casos superiores y en otros inferiores. Las personas, con sus sensores (ojos principalmente) y su procesamiento (cerebro) son capaces de ejecutar la tarea de conducción en niveles de precisión centimétrica.

Lo que para el conductor humano resulta una tarea relativamente sencilla, para el ingenio autónomo representa un reto tecnológico importante. A pesar de que los ingenios disponen de capacidades de computación expandidas, muy superiores al ser humano, el desafío radica en dotarle de las herramientas, tanto de hardware como de software, necesarias para que pueda navegar con una exactitud subdecimétrica, con tasas de errores inferiores a 10 cm.

Los sistemas de navegación extendidos universalmente, basados en constelaciones satelitales, presentan incertidumbres en el posicionamiento superiores a los 10 metros, en la gran mayoría de las ocasiones, además de una gran componente de inestabilidad en las mediciones, en función de las características del entorno. Estos márgenes de localización son adecuados para sistemas de ayuda a la conducción en situaciones en las que un conductor humano está a los mandos del vehículo, e incluso muy buenos. Pero si se plantean estos sistemas como único dato de guiado de referencia para el ingenio, resulta evidente que estos sistemas no ofrecen la exactitud necesaria para poder navegar de manera autónoma con seguridad. Un ingenio autónomo requiere de un sistema de posicionamiento local que le permita alcanzar el rango de exactitud subdecimétrica. En cualquier caso, para el correcto funcionamiento de estos sistemas de posicionamiento locales, el ingenio autónomo requiere que el entorno generado sea de muy alta calidad. Esto implica que se requieren varios sensores de alta calidad que generen una gran cantidad de datos. Los datos en bruto, no tienen ningún valor, por lo que es necesario, también, disponer de herramientas de tratamiento de datos avanzadas que permitan obtener los resultados esperados. En el caso de los ingenios de navegación autónoma, el sistema de localización agrupará la información de distintos tipos de sensores, y realizará operaciones de tratamiento de estos datos, para obtener la posición del ingenio con un alto grado de exactitud

Estas técnicas de posicionamiento local son de interés para el sector terrestre, pero también tienen un papel muy relevante en la navegación de cabotaje y en la aviación de baja cota, debido a la gran proximidad a un número elevado de objetos y elementos, que potencialmente pueden interferir con su ruta.

El principal objetivo del subsistema de posicionamiento será obtener la posición local del ingenio, dentro del entorno de navegación. Es un proceso que realizará en estrecha colaboración con el subsistema de percepción, incluso podría llegar a integrarse dentro de este segundo. La obtención de esta posición se basará en una combinación de datos procedentes de diferentes fuentes. El sistema autónomo de los ingenios podría apoyarse en los sistemas globales de posicionamiento, si fuese necesario.

Las entradas al subsistema de posicionamiento vendrán, por una parte, de estos sistemas globales de posicionamiento, y por otra, del sistema de posicionamiento propio de la Red S3, en el momento que esté implementado. El cálculo de la posición local requiere a su vez de otras dos entradas, el conocimiento obtenido en el proceso de fusión de sensores del subsistema de percepción, y la información que suministra el entorno de navegación. El



cálculo de la posición local se realiza mediante la combinación de estas entradas, siendo mucho más relevante la información procedente del entorno de navegación y la fusión de sensores. De esta forma se va obteniendo, de manera sistemática, la posición local del ingenio en todo momento, y se le proporciona al subsistema de percepción para la ejecución del resto de procesos necesarios.

5.2.1.4. Subsistema de comunicaciones

El sistema de transporte automatizado está basado en el principio de cooperación entre ingenios, permitiendo de esta manera alcanzar los objetivos de seguridad y eficiencia propuestos. El cumplimiento de este objetivo implica la incorporación a los sistemas autónomos de los diferentes ingenios de la tecnología que posibilite establecer las comunicaciones entre los diferentes agentes que forman parte del sistema de transporte.

El subsistema de comunicaciones está compuesto por el conjunto de elementos que se encargan de establecer los canales de comunicación del ingenio con el exterior, tanto de entrada como de salida. Este subsistema ha de permitir que el ingenio se comunique con otros ingenios, con la Red S3, con su propietario (operador o usuario) y con el Centro de Control de Tráfico.

El ingenio tendrá incorporado una placa o unidad OBU (*On Board Unit*) con la tecnología necesaria para establecer las conexiones con la Red S3, en función del contexto en el que se desarrolle la navegación autónoma. En el apartado 5.3 se detallan las características de la red de comunicaciones y todos los procesos que realiza. En especial, en el apartado 5.3.3 se analizan las comunicaciones específicas de los ingenios.

5.2.1.5. Subsistema de percepción

A partir del conocimiento detallado del entorno, la localización del ingenio dentro del mismo y la información recolectada por los sensores del ingenio, la navegación autónoma consiste en la toma de decisiones y la actuación sobre los parámetros de control del ingenio, para garantizar la seguridad del trayecto en todo tipo de escenarios. El subsistema de percepción se encarga del procesamiento e interpretación de este conocimiento e información, para la posterior toma de decisiones. Es aquí donde radica la gran complejidad asociada a la navegación autónoma: existen gran cantidad de eventos, con muy baja probabilidad de aparición, para los cuales el sistema debe ser capaz de demostrar su capacidad de reacción a priori y actuar asegurando la integridad del ingenio y los ocupantes (*The Long Tail problem*) [160], [161].

Adicionalmente, la navegación autónoma presenta una serie de características y necesidades que acotan las posibles técnicas de Inteligencia Artificial candidatas a la creación de estos sistemas. En primer lugar, debe ser asegurada la trazabilidad del método, garantizando en todo momento que cualquiera de las decisiones efectuada por el sistema pueda ser justificada y revisada (este es uno de los principales problemas de los métodos de "caja negra", donde no existe conocimiento sobre la forma de actuar del sistema). La trazabilidad de las técnicas empleadas es un factor crítico para la navegación autónoma, especialmente para esclarecer las causas de eventuales accidentes o siniestros y asegurar que no sucedan en el futuro. Pero, sobre todo, esta trazabilidad del método es esencial



para lograr certificar estos sistemas autónomos con los niveles de seguridad apropiados para su aceptación por la sociedad.

El siguiente aspecto a tener en cuenta es la robustez del método, entendida como la capacidad que debe poseer el sistema para actuar ante fenómenos no previstos, así como la tolerancia a la incertidumbre e imprecisión, durante el funcionamiento en condiciones autónomas. Es en este punto donde surgen dos corrientes diferenciadas, que habitualmente combinan alguna de sus características para crear nuevas técnicas: aprendizaje automatizado o aprendizaje basado en reglas (enmarcado dentro del razonamiento aproximado y el *soft-computing*). El aprendizaje automatizado genera modelos de conocimiento en base a los datos existentes sobre los fenómenos en cuestión. Por otro lado, el aprendizaje basado en reglas condensa el modelo de conocimiento sobre una materia en base a una serie de reglas predefinidas, que permiten al sistema realizar razonamientos aproximados y manejar la incertidumbre propia de fenómenos naturales.

Actualmente, el aprendizaje automatizado ha adquirido una enorme importancia, gracias a su capacidad de obtención de patrones complejos a partir de los datos obtenidos del entorno en cuestión (*machine learning*). No obstante, estas técnicas presentan una dependencia intrínseca de los datos empleados, de forma que los modelos de conocimiento obtenidos con estos procedimientos están severamente limitados en situaciones para las que no han sido entrenados. Adicionalmente, estas técnicas requieren habitualmente de ciertas propiedades sobre los datos (como el balanceamiento de casos en los *datasets*) que difícilmente son alcanzables en realidades estocásticas.

Por parte del aprendizaje basado en reglas, el modelo es generado en base al conocimiento de expertos sobre la temática en cuestión, residiendo en este punto la complejidad del sistema a la hora de acometer tareas de elevada dificultad. En el caso de la navegación autónoma, estos sistemas podrían permitir la capacidad de razonamiento aproximado de los ingenios, pero la creación de las reglas necesarias es un problema con difícil aproximación desde el punto de vista convencional de los sistemas expertos.

En base a lo planteado, los sistemas de navegación con mayores posibilidades de éxito serán aquellos que combinen las mejores características de ambas corrientes: la identificación de patrones generales y detallados en base a la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (supervisado y no supervisado) sobre datos de simulaciones del entorno; y la generación de reglas a partir de los patrones obtenidos, que permitan la introducción de técnicas *soft-computing* para conseguir un proceso de navegación seguro, robusto en cualquier circunstancia y con posibilidad de mejora continua.

El objetivo del sistema de percepción es dotar al ingenio de la situación de conciencia. Alcanzar este objetivo necesita una serie de procesos internos. El primero de estos procesos es la fusión de sensores, que consiste en combinar las medidas de diferentes sensores, bien sean de la misma clase o de distintas clases. Cada sensor aporta información más o menos detallada de los elementos del entorno. El proceso de fusión se encarga de combinar estas informaciones parciales para obtener una representación global del entorno del ingenio, con el mayor nivel de detalle posible.

El siguiente proceso es la detección e identificación de elementos u objetos dentro del entorno de navegación. Es un proceso que se realiza en tiempo real, y en el que el ingenio utiliza la información recopilada por los distintos sensores de percepción externos. Es importante destacar que el entorno de navegación incluye a su vez información sobre los



objetos estáticos que existen alrededor de los viales y zonas de navegación. Son procesos complementarios de obtención de información, que será contrastada en una etapa posterior.

Una vez se han detectado los objetos dinámicos, el sistema autónomo ha de realizar un proceso conocido como previsión de trayectorias externas, correspondientes a estos objetos detectados. El objetivo es dotar al ingenio de la capacidad de reacción ante cualquier posible trayectoria de los objetos u elementos cercanos, que potencialmente pudieran cruzarse en su trayectoria o poner en riesgo su integridad.

Completados estos procesos, el subsistema de percepción tiene que realizar la detección de la zona de navegación, es decir, aquella región del entorno por la que podrá navegar. En el sector terrestre será la calzada, y dentro de ella el carril correspondiente. En los casos aéreo y marino este proceso es ligeramente diferente, al no existir una infraestructura construida para su navegación. En este proceso se ha de incluir la generación de conocimiento respecto al estado de dicha zona. Es muy relevante identificar si existen condicionantes que puedan afectar a la navegación del ingenio, como puede ser un campo de visión reducido, debido a condiciones meteorológicas como lluvia intensa o niebla, o debido a otros factores que pudieran afectar al funcionamiento del sistema, y requiriese tomar medidas especiales, como una reducción de velocidad.

El hecho de que se haya detectado la zona de navegación no implica necesariamente que se pueda realizar la navegación, total o parcialmente. Por lo tanto, será necesario un último proceso, la detección de la zona libre de navegación. Para la identificación de la zona libre para la navegación se tendrán en cuenta la zona de navegación y las trayectorias de los objetos cercanos al vehículo, que limitarán las posibilidades de movimiento de este. Una vez finalizado este proceso, el vehículo dispondrá de información sobre su propio estado, los elementos cercanos, el movimiento de estos, y las posibilidades con respecto a su propio movimiento, de forma que su integridad no se vea comprometida en ningún momento.

Convencionalmente en el diseño de los sistemas autónomos para vehículos autónomos, en el sistema de percepción se incluye la detección de señales y marcas viales. En el diseño de los sistemas autónomos para ingenios, pensados para navegar en este sistema de transporte automatizado, es un proceso que no resulta necesario. La existencia de una infraestructura digital, como es el entorno de navegación, proporciona de antemano toda la normativa y regulación de tráfico que cualquier ingenio necesita conocer para la realización de su misión. Además, este diseño permitirá la generación de reglas dinámicas de tráfico, que puedan adaptarse y modificarse en tiempo real, según las circunstancias. Esto representa un gran avance y un gran salto cualitativo, respecto a cualquiera de las técnicas convencionales de gestión del tráfico conocidas hasta la fecha.

5.2.1.6. Subsistema de planificación

El propósito principal del ingenio autónomo, y por ende del sistema autónomo, es realizar una ruta desde un origen hasta un destino sin ningún tipo de intervención humana, y esto implica que el sistema autónomo ha de ir tomando decisiones a lo largo de toda la ruta. El subsistema de planificación es el encargado de la toma de decisiones en base a la información obtenida por los sensores, el entorno de navegación, el posicionamiento del



ingenio dentro de dicho entorno y las salidas proporcionadas por el subsistema de percepción.

Las decisiones que toma el ingenio están vinculadas a las trayectorias que va tomando en todo momento y, en base a estas, el subsistema de control gestionará los actuadores del vehículo, para cumplir la trayectoria que se está llevando a cabo. Recordando lo expuesto con anterioridad, las decisiones a largo plazo las toma el Centro de Control de Tráfico, es decir, las rutas globales asignadas a cada ingenio, mientras que son los ingenios los que toman las decisiones a corto plazo, es decir, las trayectorias locales dentro de las rutas globales.

La principal salida que proporciona el subsistema de percepción es la detección de la zona libre de navegación, el espacio por el que el ingenio puede desplazarse con garantías de seguridad. En base a esta información, la primera tarea que se encarga de ejecutar el subsistema de planificación es el cálculo de todas las trayectorias posibles que el ingenio puede ejecutar, dentro de la zona libre de navegación.

El subsistema de planificación recibe otra entrada fundamental, en este caso desde el Centro de Control de Tráfico, que es la recepción de la ruta óptima final. En la explicación realizada en el apartado 5.1.4.2, se trataba el ingenio como un todo, cuya misión final era recibir la ruta asignada por el CCT. Esta recepción de ruta está asignada al subsistema de planificación del ingenio. Es esta ruta optimizada por el CCT la que tomará como referencia el ingenio en todo momento, y la seguirá siempre que no haya ningún impedimento que pueda comprometer su seguridad.

La combinación de estas dos entradas principales, la ruta óptima final y la generación de trayectorias posibles, dentro de la zona libre de navegación, se realiza dentro del proceso principal del subsistema, que es la generación de la trayectoria final. Con toda la información recibida por el conjunto de subsistemas, y las ordenes de ruta óptima proporcionadas de manera externa, el subsistema de planificación elegirá la trayectoria que seguirá el ingenio en todo momento. Esta elección incluye todos los parámetros necesarios para la ejecución de la misma, como son la velocidad a seguir en todo momento, la dirección, el sistema de frenado, etc. La elección tendrá presente la normativa y regulación de tráfico, que ha de ser cumplida en todo momento. En definitiva, es la toma de las decisiones del sistema autónomo.

5.2.1.7. Subsistema de control

La toma de decisiones que realiza el sistema autónomo requiere de su ejecución, siendo el subsistema de control el encargado de esta tarea. El subsistema de control está formado tanto por software, encargado de los procesos intrínsecos a cualquier sistema de control, como por hardware y elementos mecánicos que se encarguen de dotar al ingenio de movimiento. Estos elementos mecánicos se agrupan dentro del grupo de actuadores.

Se está realizando un análisis genérico, válido para cualquier clase de ingenio. Sin embargo, el subsistema de control, junto a los sensores del ingenio, será la parte del sistema autónomo que presente mayores diferencias de un tipo de ingenio a otro, no solo debido al medio de navegación del propio ingenio, sino también debido a la misión y características para las que haya sido diseñado. No es objetivo de esta tesis doctoral, ni entra dentro de su alcance, analizar los diferentes sistemas de control y técnicas de control empleadas en



los diferentes tipos y modelos de ingenios autónomos. El sistema de control de una aeronave de despegue y aterrizaje vertical poco se parecerá al sistema de control de una furgoneta de reparto de mercancías. El diseño de estos sistemas de control es una tarea propia del proceso de diseño de cada ingenio.

La entrada que recibe el subsistema de control es la trayectoria local que genera el subsistema de planificación. Esta información llega al proceso de control paramétrico de los actuadores, que se encarga de realizar el cálculo de la configuración, actuaciones y coordinación que necesita realizar cada uno de ellos, para que se pueda ejecutar dicha trayectoria en las condiciones necesarias. Este proceso se comunica directamente con cada uno de los actuadores que tengan que intervenir en cada una de las maniobras necesarias. Los actuadores pueden ser muy diversos, dependiendo de cada ingenio, incluyendo desde la dirección de las ruedas, el acelerador, los alerones o el timón, entre muchos otros.

Una vez los actuadores han recibido estas instrucciones, se encargarán de ejecutar su tarea. Es el propio subsistema de control el que se encarga de la supervisión y control de este proceso, realizando las modificaciones y correcciones que fuesen necesarias para adecuarse a la trayectoria deseada en todo momento.

La consecuencia del funcionamiento de los actuadores es el movimiento del ingenio, que ejecuta la ruta deseada. Constituye, así, la consecución del objetivo último, la movilidad del ingenio.

5.2.1.8. Subsistema de estado

El sistema autónomo tiene la necesidad de tener una visión completa del estado del ingenio en todo momento. El subsistema de estado estará formado principalmente por un sistema de almacenamiento interno del ingenio, que actúe a modo de base de datos y guarde información sobre los procesos más destacados que realiza el ingenio en su conjunto.

Esta base de datos actuará de soporte para el resto de subsistemas que en algún momento necesiten obtener algún tipo de información contenida en ella. Una de sus funciones más importantes será realizar registros. Uno de ellos es el registro de la información obtenida por los sensores de percepción externa. Dependiendo de las características propias de la navegación de cada ingenio, el tipo y nivel de detalle de la información almacenada podrá variar. Desde un tipo de almacenamiento completo, en el que se registren todos los datos recogidos por el vehículo, hasta tipos de almacenamiento con menor registro de datos, lo que reduce el espacio de almacenamiento. Un ejemplo de estos últimos es el almacenamiento de información tan solo en situaciones críticas para la navegación.

Por otra parte, está el registro del estado del ingenio, que se realiza con la información procedente de los sensores de percepción interna. Esta información permite obtener una visión de cuál es el estado del ingenio en todo momento, y supone una cuestión clave en lo relativo a las tareas de mantenimiento que puedan resultar necesarias.

De acuerdo a lo explicado anteriormente, el sistema autónomo ha de tomar decisiones, principalmente relacionadas con las trayectorias que va eligiendo a lo largo de la ruta. Del análisis entre las trayectorias posibles obtendrá la trayectoria que considere más apropiada. Este proceso se registrará también en el subsistema de estado. En caso de que se

produjera algún tipo de incidente o accidente, esta información será crítica para esclarecer los hechos ocurridos. De igual modo, será de especial interés para la mejora continua y optimización del propio sistema autónomo.

Otro de los registros importantes, con una estrecha vinculación al anterior, es el registro de actuación, que se encarga de guardar la información del desempeño de los diferentes actuadores del ingenio, que son el brazo ejecutor de las decisiones que toma el sistema autónomo.

El subsistema de estado estará conectado con el subsistema de comunicaciones para poder transmitir la información de estos registros tanto al Centro de Control de Tráfico como a su propietario u operador, cuando sea necesario, bien por solicitud expresa o bien como parte de un procedimiento rutinario.

5.2.2. Estructura del sistema autónomo de los ingenios

La conceptualización de la estructura de funcionamiento genérico del sistema autónomo, de cualquier ingenio que forme parte del sistema de transporte automatizado, es una tarea crítica en el proceso de diseño. Independientemente de la gran variedad que pueden tener los ingenios, en sus características o misiones que desempeñan, todos los sistemas autónomos tendrán el mismo patrón de comportamiento. Esta estructura implica la definición de la arquitectura genérica de los sistemas autónomos y la descripción de los principales procesos que desempeñará el propio sistema autónomo.

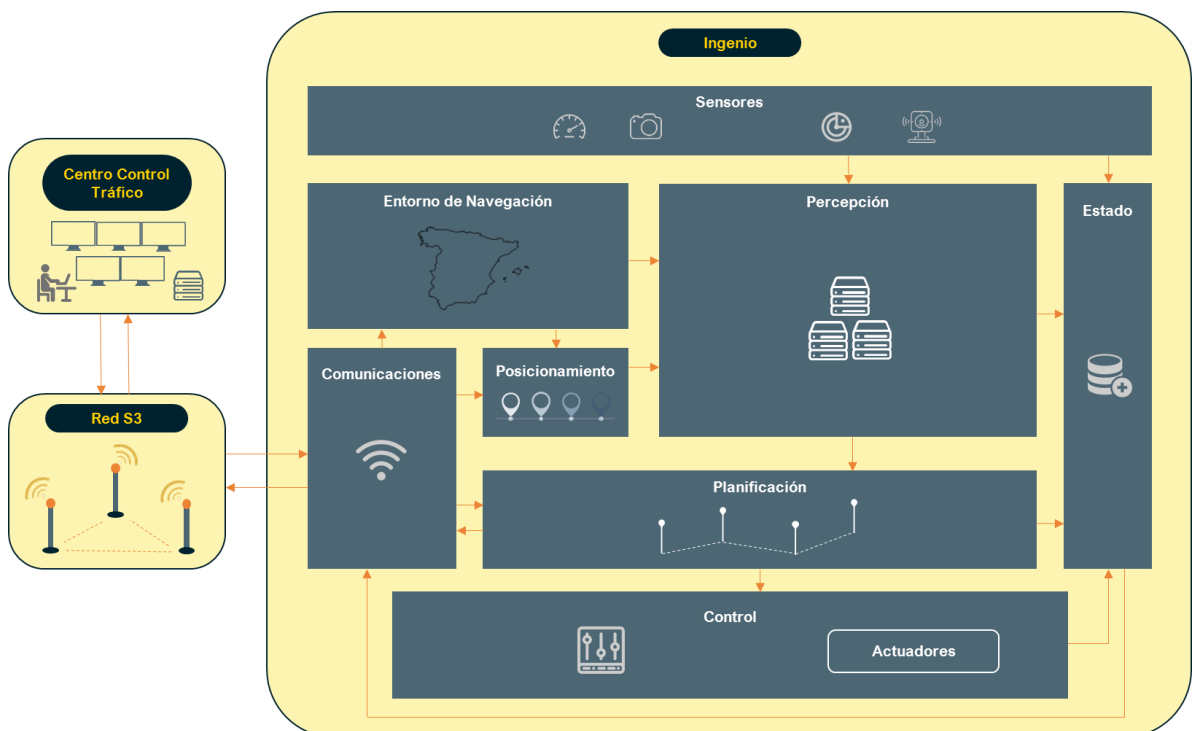


Figura 5. 8. Arquitectura genérica del sistema autónomo de un ingenio.

5.2.2.1. Arquitectura genérica del sistema autónomo

Habiendo realizado el análisis y descripción de los elementos y subsistemas comunes a todo sistema autónomo en el apartado 5.2.1, la definición de la arquitectura genérica consiste en establecer las principales relaciones entre ellos. Esta arquitectura se representa de manera gráfica en la Figura 5. 8.

En esta arquitectura se considera al Centro de Control de Tráfico como un ente con el que se relacionan los ingenios. Su arquitectura interna ya fue expuesta en el apartado 5.1. Ocurre lo mismo con la Red S3, que se describirá en el apartado 5.3, y es considerada como el elemento de comunicación entre ingenios y CCT.

5.2.2.2. Procesos principales del sistema autónomo

La arquitectura genérica del sistema autónomo, su estructura y funcionamiento, se deduce del diseño de los procesos principales que desempeñará. Estos procesos están enmarcados, a su vez, dentro de la estructura general del sistema de transporte automatizado, implicando por tanto al resto de elementos que lo conforman. Los procesos principales que se analizan son:

- Percepción del entorno y situación de conciencia
- Cálculo de ruta
- Cambio de ruta (ingenio)

La descripción de cada uno de estos procesos, que en ocasiones son simultáneos, se realiza en los siguientes apartados.

5.2.2.2.1. Percepción del entorno y situación de conciencia

La navegación autónoma presenta grandes retos tecnológicos para que pueda desempeñarse con todas las garantías de seguridad. El sistema autónomo ha de realizar un conjunto de tareas de alta complejidad e integrarlas para conseguir sus objetivos. Uno de los retos críticos para dotar a un ingenio con los mayores niveles de autonomía es alcanzar la denominada “situación de conciencia”. Este concepto hace referencia al estado en el que el sistema autónomo tiene un conocimiento detallado de sí mismo, del entorno de navegación en el que se encuentra, del conjunto de objetos y elementos presentes en dicho entorno, de su posición en el entorno, de las posiciones de estos elementos y objetos respecto a sí mismo, y de sus posibles relaciones e interacciones con ellos.

El proceso de percepción del entorno y situación de conciencia es el que permite al ingenio alcanzar esta situación. Para ello se ven involucrados diferentes subsistemas del sistema autónomo, así como la cooperación con el CCT y la Red S3. Se representa gráficamente en la Figura 5. 9.

El comienzo de este proceso se puede establecer en los sensores de percepción externa del ingenio. Recordando que el tipo de sensores y la configuración de los mismos dependerá de la clase de ingenio en cuestión. Su misión es captar magnitudes físicas del entorno del mismo. Estos sensores están repartidos a lo largo de la estructura del ingenio, y aportan datos de 360° alrededor del ingenio. El resultado del funcionamiento de estos sensores son datos, grandes cantidades de datos, que por sí mismos no tienen gran valor.

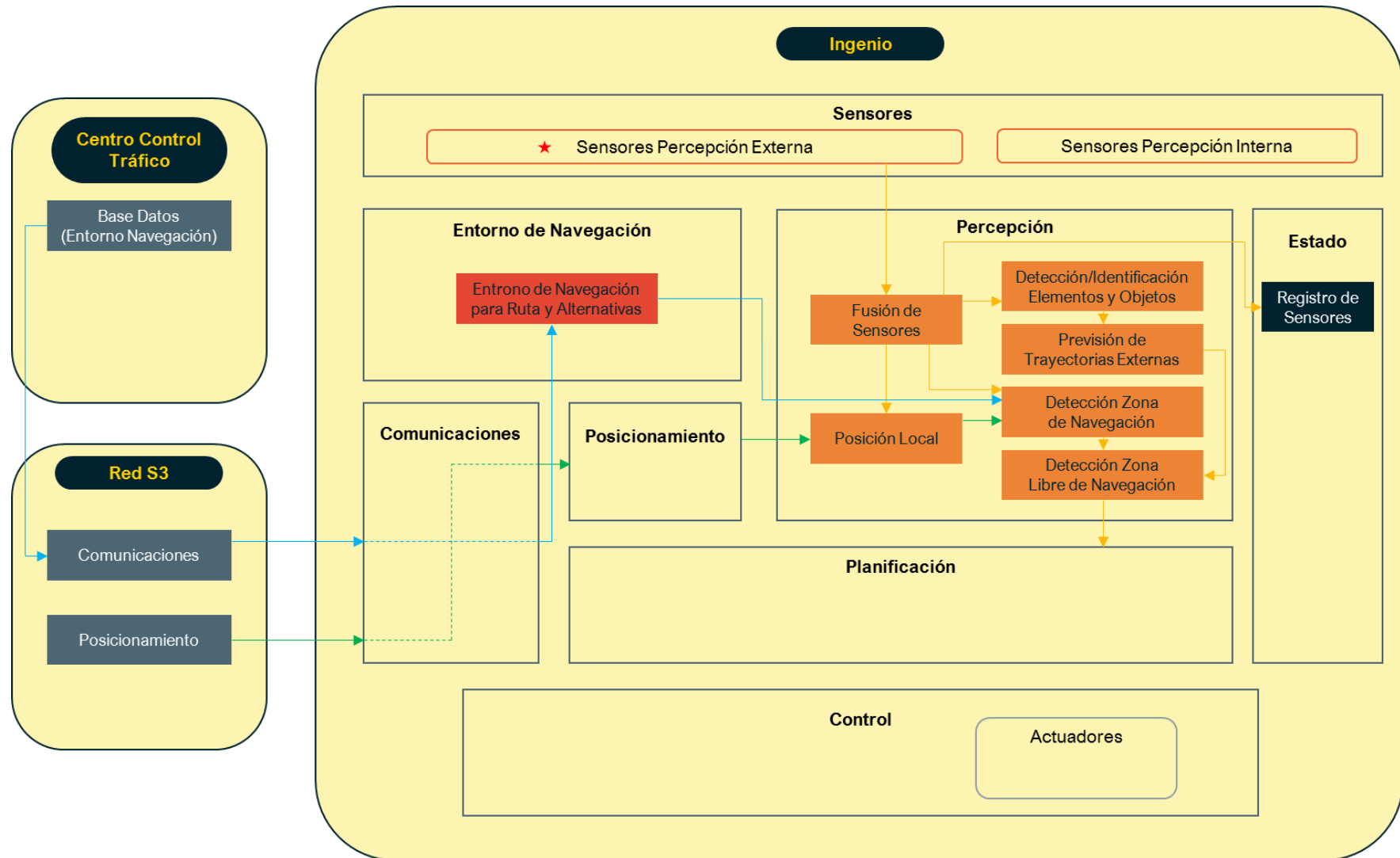


Figura 5. 9. Arquitectura del proceso de percepción del entorno y situación de conciencia del ingenio.



Estos datos son enviados al subsistema de percepción, donde se procederá a su tratamiento para ponerlos en valor y que el sistema autónomo pueda interpretarlos. En primer lugar, los datos llegan al proceso de fusión de sensores. De acuerdo al análisis anterior de este proceso, consiste en la combinación de los datos aportados por los diferentes sensores, bien sean de la misma clase o de distintas. De esta forma se obtiene una visión homogénea del conjunto de percepciones y mediciones, realizadas por los diferentes sensores.

La fusión de sensores tendrá tres salidas principales. La primera, hacia el subsistema de estado, donde se realizará un registro de sensores. Este registro se realizará una vez completado el proceso de fusión, debido a la simplificación y estructuración de conocimiento que aporta. Almacenar la totalidad de los datos en bruto generados por los distintos sensores requeriría de una gran capacidad de almacenamiento. Sin embargo, almacenar los datos, tras fusionar la información y eliminar información redundante, permite reducir los costes asociados a dicho almacenamiento. La segunda salida es hacia el proceso de detección e identificación de elementos y objetos. Y la tercera salida se realiza hacia el proceso de detección de la zona de navegación.

Agrupada la información en la fusión de sensores, llega al siguiente proceso que, como su nombre indica, se encarga de detectar los diferentes elementos y objetos que se encuentran alrededor del ingenio en el entorno de navegación. Una vez detectados, se procede a su identificación, con el objetivo de mejorar el conocimiento del sistema respecto a su entorno y poder aplicar el tratamiento apropiado a cada uno de estos objetos y elementos. La salida de este proceso se envía al siguiente, la previsión de trayectorias externas.

En el momento que se ha identificado el conjunto de elementos y objetos cercanos, se pueden clasificar en estáticos y dinámicos, resultando de especial interés estos segundos. Es fundamental realizar el cálculo de las posibles trayectorias que podrían tener estos objetos dinámicos, para identificar aquellas potencialmente peligrosas, que pudieran afectar o comprometer la integridad del ingenio, y de esta forma poder tomar las medidas correspondientes para evitar tal situación.

Llegados a este punto, es necesario analizar otros procesos que se realizan de manera paralela en otros sistemas, que resultarán de especial interés para continuar con la explicación de este caso de uso.

De acuerdo al análisis del entorno de navegación, hecho en el apartado 5.2.1.1, el Centro de Control de Tráfico se encargará de suministrar los entornos de navegación segmentados a los diferentes ingenios, para que puedan completar su misión. Antes de que dé comienzo ninguna ruta, el CCT proporcionará al ingenio esta información. La infraestructura digital que forman los mapas de los entornos de navegación es almacenada por el CCT en su base de datos, desde donde se enviará la segmentación necesaria para cada ingenio. Este envío se realizará por medio de la red de comunicaciones, llegando al subsistema de comunicaciones del ingenio. El subsistema de comunicaciones lo enviará directamente al subsistema de entornos de navegación. De esta forma el ingenio tendrá un mapa completo del entorno de navegación por el que se va a desplazar. Por razones de operatividad, eficiencia y seguridad, el entorno de navegación no se limitará exclusivamente a la ruta que le sea asignada, sino que deberá contener información de un conjunto de rutas alternativas, que pudieran ser empleadas ante cualquier situación no prevista inicialmente para llegar a



su destino y completar su misión. Por ejemplo, un ingenio, que se dedique a operar sistemáticamente en un entorno urbano dando servicios de movilidad a una ciudad, tendrá el mapa al completo de la ciudad en cuestión. En cambio, a un ingenio, que tenga que realizar una misión de transporte entre dos ciudades, se le proporcionará el entorno de navegación de la ruta óptima, así como las posibles alternativas que pudiera utilizar en caso de cualquier contratiempo.

El ingenio recibe otra entrada externa relacionada con los sistemas de posicionamiento. Por una parte, la posición que proceda de sistemas de posicionamiento global, empleada a modo de apoyo. Y, por otra parte, la posición que proporcionará la propia Red S3 desde su sistema propio de posicionamiento local, que será analizado más adelante en esta tesis doctoral. La primera será obtenida por el propio ingenio en su subsistema de posicionamiento, y la segunda llegará desde la Red S3 al subsistema de comunicaciones, que a su vez la enviará al subsistema de posicionamiento. Combinando estas informaciones con la salida proporcionada por la fusión de sensores, se procede al cálculo de la posición local del ingenio dentro del entorno de navegación. En la Figura 5. 9 este proceso se representa dentro del subsistema de percepción.

Regresando al hilo de este caso de uso, en el subsistema de percepción, en paralelo, se realiza un proceso denominado detección de la zona de navegación. Este proceso tiene tres entradas, la primera proviene de la fusión de sensores, la segunda del entorno de navegación, y la tercera de la posición local. El objetivo principal es identificar el vial por el que se ha de realizar la navegación, en el caso terrestre será la calzada, y en los casos aéreo o marino las vías correspondientes. Una vez se ha detectado esta zona de navegación, el siguiente proceso es la detección de la zona libre de navegación. Este proceso recibe una segunda entrada procedente de la previsión de trayectorias externas. La combinación de ambas entradas es crucial, puesto que será el momento en el que el sistema autónomo identifique las regiones de la zona de navegación, que estarán despejadas de cualquier objeto o elemento que imposibilitase su navegación.

Realizados este conjunto de tareas y procesos, el sistema autónomo, y por ende el ingenio, habrá alcanzado la deseada situación de conciencia, estando en condiciones de poder tomar las decisiones que le permitan navegar de manera autónoma, con todas las garantías de seguridad. El proceso de percepción del entorno y situación de conciencia concluye en este punto.

5.2.2.2.2. Cálculo de ruta

La tarea más relevante y característica del sistema autónomo de cualquier ingenio es la toma de decisiones que le permitan seguir la ruta deseada para llegar hasta su destino. Este cálculo de ruta es un proceso que se ejecuta de manera constante en el sistema autónomo.

Recordemos que en el sistema de transporte automatizado la función del cálculo de rutas corresponde al Centro de Control de Tráfico, encargado de calcular y asignar rutas óptimas al conjunto de ingenios. Por esta razón, este proceso se inicia en el CCT, una vez ha calculado la ruta óptima final para el ingenio. Este proceso integra al completo el proceso anterior de percepción del entorno y situación de conciencia del ingenio.

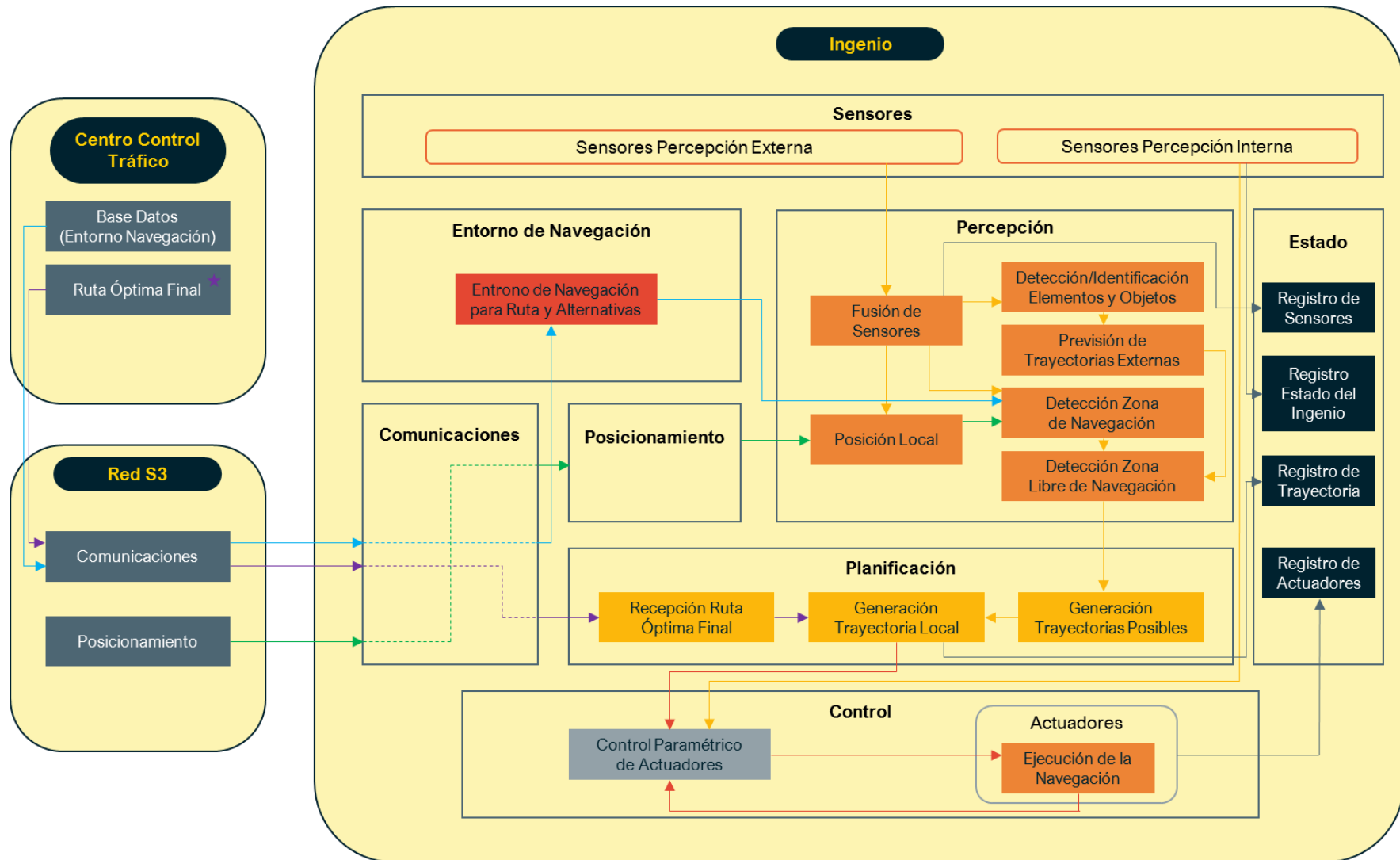


Figura 5. 10. Arquitectura genérica del proceso de cálculo de ruta de un ingenio.



Esquemáticamente se analiza el proceso en la Figura 5. 10. El proceso comienza con el envío desde el CCT de la ruta óptima final para el ingenio y el entorno de navegación para dicha ruta y sus alternativas. Ambos mensajes se trasladan al ingenio por medio de la Red S3, llegando al subsistema de comunicaciones, encargado de despacharlos a sus respectivos destinos.

Continuando con el proceso anterior (apartado 5.2.2.2.1), la salida del subsistema de percepción es la detección de la zona libre de navegación, que se envía al subsistema de planificación. Recibida esta información, se procede a la generación de las trayectorias posibles que puede seguir el ingenio dentro de la zona libre de navegación.

Simultáneamente el subsistema de planificación recibe la ruta óptima final del subsistema de comunicaciones (enviada por el CCT). El proceso más relevante de este subsistema de planificación se realiza mediante la combinación de ambas entradas, y es la generación de la trayectoria final. La trayectoria final es el camino que el sistema autónomo sigue dentro de la ruta óptima asignada, habiendo valorado todas las posibles trayectorias que podría seguir en función de las condiciones y circunstancias del entorno de navegación. En definitiva, es la toma de decisiones del sistema autónomo, en base a todos los datos disponibles y procesos de tratamiento previos, que se han realizado para conseguir que esta toma de decisiones sea la mejor. Al ser un proceso cíclico, realizado numerosas veces por segundo, las trayectorias locales que va siguiendo el sistema autónomo se envían al subsistema de estado para realizar un registro de trayectorias.

Una vez se ha decidido la trayectoria local que se va a seguir, el subsistema de planificación se la envía al subsistema de control. El subsistema de control depende en gran medida del tipo de ingenio y sus características. De manera genérica se considera que existe un módulo de control paramétrico de actuadores, encargado de dar órdenes a los diferentes actuadores, para que ejecuten las acciones deseadas con el fin de desplazar al ingenio en los términos necesarios. Este módulo recibe la entrada de la trayectoria local a seguir, así como la información de los sensores de percepción interna que sean necesarios para realizar el control del movimiento del ingenio. Una vez ha calculado las acciones que han de tomar los actuadores, le traslada las órdenes pertinentes a los actuadores para que las ejecuten, y se consiga por tanto el movimiento del ingenio. El bucle de control sobre los actuadores es un proceso que se ejecuta de manera permanente.

Los sensores de percepción interna se comunican con el subsistema de estado para realizar un registro de estado del ingenio, que permite obtener una visión continua de cuál es el estado, y analizar la necesidad de algún tipo de intervención de mantenimiento. De igual modo, los actuadores se comunican con el subsistema de estado para realizar un registro de actuadores, de gran interés para realizar análisis de comportamiento y poder esclarecer el comportamiento del ingenio, en el caso de que se produzca algún incidente.

Con la puesta en marcha del ingenio para comenzar la ruta, y el continuo proceso de control del sistema autónomo a lo largo de la ruta, se da por finalizado el proceso de cálculo de ruta del ingenio.

5.2.2.2.3. Cambio de ruta (ingenio)

En el transcurso de la ruta que realice cualquier ingenio se pueden dar una serie de circunstancias no previstas que pueden hacer necesario modificar la ruta planificada. La



automatización del tráfico, que tiene como uno de sus fundamentos principales la automatización y optimización de las rutas del conjunto de ingenios, ha de estar diseñada para integrar todos estos posibles fenómenos dentro de su arquitectura, formando parte de la normalidad. En el apartado 5.1.4.2.2 de la tesis se analizó el procedimiento de gestión por parte del CCT de todas las solicitudes de cambio de ruta que podrían ocasionarse. En este apartado se profundiza en el caso de cambio de ruta por solicitud del ingenio.

El cambio de ruta solicitado por el ingenio está descrito gráficamente en la Figura 5. 11. Basándose en el hecho que es un proceso que se iniciará en algún momento del transcurso de una ruta, se parte de la base que integrará el proceso anterior del cálculo de ruta y, por ende, el proceso de percepción del entorno y situación de conciencia. La arquitectura de referencia del proceso es la del cálculo de ruta del ingenio, que es un proceso iterativo que se está ejecutando de manera constante. En el momento que surja la circunstancia o anomalía, que haga que el sistema autónomo detecte la necesidad del cambio de ruta, se iniciará este caso de uso.

La responsabilidad de detectar estas circunstancias o anomalías, que requerirían de un cambio de ruta, corresponde al subsistema de percepción, pero la decisión recae en el subsistema de planificación. Es una decisión que se toma en la generación de la trayectoria local. De acuerdo a lo expuesto con anterioridad, el CCT tiene la función del cálculo de rutas a largo plazo, y el ingenio tiene la función del cálculo de rutas en el corto plazo. La modificación de rutas deberá llevarse a cabo en el supuesto de que las circunstancias de entorno del vehículo no le permitiesen seguir la ruta de navegación propuesta por el CCT. Esta circunstancia podría darse, por ejemplo, en el caso de un ingenio terrestre cuando un elemento externo se encontrase inmóvil en la calzada. Se iniciará por tanto un proceso de modificación de ruta para prevenir la colisión con dicho elemento.

Una vez que el sistema autónomo del ingenio constata que no es posible seguir la ruta de navegación indicada por el CCT, se activa el procedimiento de actuación de emergencia. En este caso el ingenio utilizará, de entre las trayectorias posibles en el espacio libre para la navegación, aquella que suponga una modificación menor sobre la ruta inicialmente prevista por el CCT. El ingenio realizará las acciones necesarias para preservar en todo momento la seguridad de la conducción, tanto para sus propios ocupantes como para el resto de usuarios de la vía, retornando a su estado de funcionamiento normal tan pronto como sea posible. De forma inmediata se informará, a través de la Red S3, al CCT para que ejecute los procedimientos descritos en la Figura 5. 6. El mensaje intercambiado entre el ingenio y el CCT incluirá información sobre el estado del vehículo, el motivo de la modificación de ruta y la nueva ruta local que el vehículo está utilizando, con el objetivo de que el CCT pueda modificar la ruta de otros ingenios, para actuar de forma proactiva frente al riesgo identificado. De forma simultánea, el ingenio registrará la modificación de la trayectoria en el subsistema de estado, lo que permitirá realizar un análisis en profundidad, a posteriori, en caso de resultar necesario.

El resultado de la intervención del CCT resultará en última instancia en la asignación de una nueva ruta de navegación óptima final, adaptada a la casuística que originase la situación de emergencia y que tendrá en cuenta el nuevo estado del ingenio y las maniobras realizadas para la evasión del peligro. Se recuperará entonces el bucle de operación normal del sistema autónomo, hasta completar el trayecto o encontrar una nueva situación de emergencia.

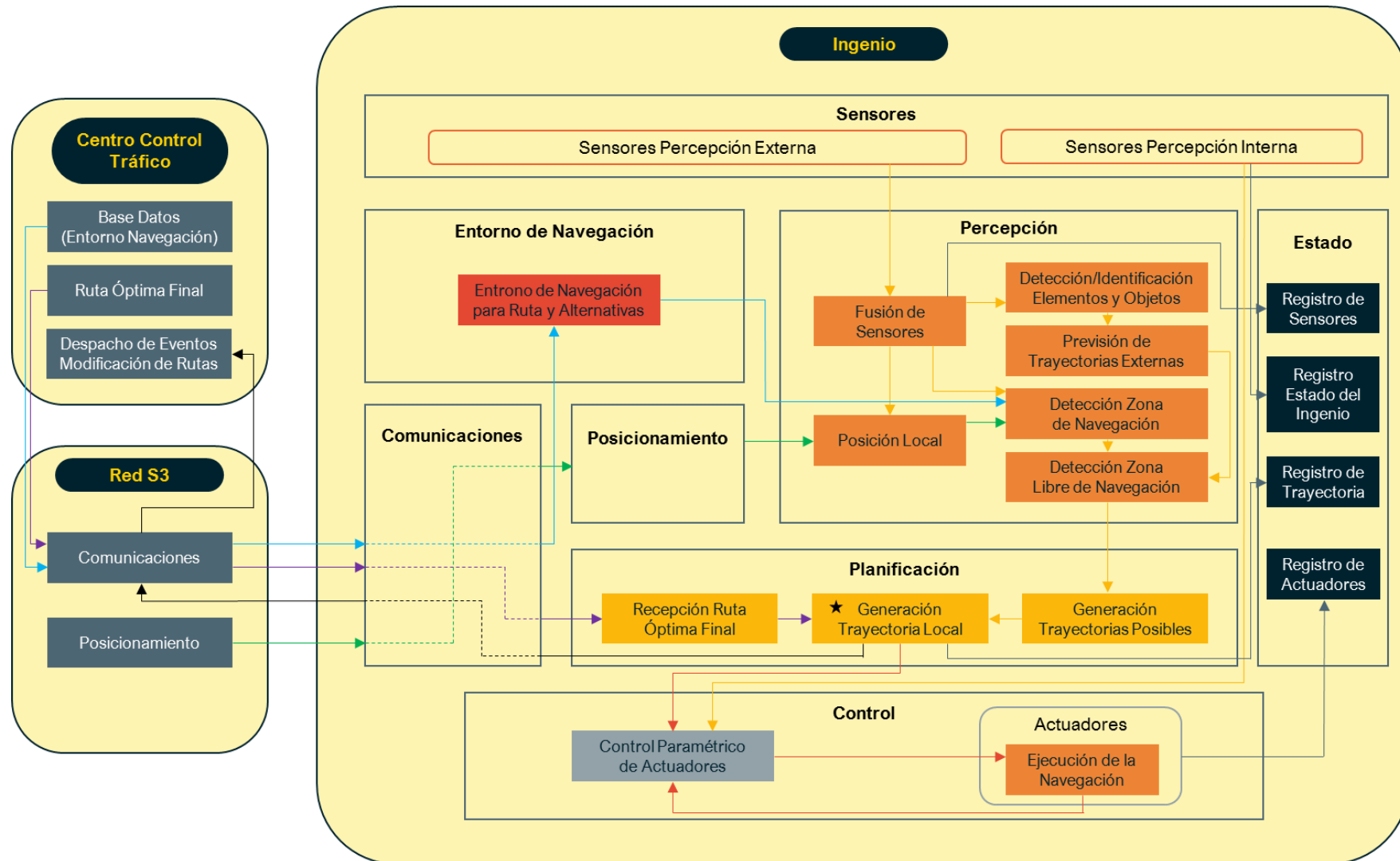


Figura 5. 11. Arquitectura genérica del proceso de cambio de ruta realizado por parte de un ingenio.



5.2.3. Caracterización y particularidades del sistema autónomo en los diferentes modos de transporte

La conceptualización del sistema de transporte automatizado requiere de un análisis de carácter genérico de los principales elementos y agentes involucrados. Se ha descrito el comportamiento genérico del sistema autónomo, común a cualquier ingenio que navegue de manera autónoma. Sin embargo, resulta conveniente realizar una particularización para los ingenios de cada modo de transporte.

El proceso de diseño de un ingenio es una tarea compleja, y además es individualizada. Cada ingenio requiere de un diseño específico de principio a fin. En el caso del sistema autónomo, ocurre lo mismo, el diseño deberá seguir los principios de funcionamiento descritos hasta ahora, pero deberá realizarse un diseño propio del conjunto de procesos adaptados a sus necesidades específicas.

Las principales diferencias entre los ingenios vienen determinadas por una serie de factores. El medio por el que se desplace el ingenio tiene una gran relevancia, las características físicas de la superficie terrestre, las del aire o las del mar son muy diferentes, y requieren de tecnologías muy dispares para que los ingenios puedan desplazarse por ellos. Estas características físicas afectan también a la percepción de los entornos, y por tanto a los sensores empleados, encargados de medir diferentes magnitudes físicas. La navegación es otro factor determinante. Las características del medio y las tecnologías empleadas por el ingenio para desplazarse establecen las técnicas necesarias para ejecutar la navegación. La carga de pago es un factor muy influyente. La misión que ha de realizar un ingenio y, por tanto, para la que se diseña, está muy supeditada a la carga útil que se ha de transportar.

En este apartado se realiza un análisis de las principales diferencias y condicionantes que afectan al sistema autónomo de los ingenios, según el ámbito de utilización.

5.2.3.1. Sistema autónomo para los ingenios terrestres

El tráfico rodado se desarrolla en entornos específicamente diseñados y habilitados para tal fin, como son las calles en los entornos urbanos y las carreteras en entornos interurbanos. Se han realizado importantes inversiones en estas infraestructuras, para mejorar las condiciones de circulación de los vehículos. Sin embargo, una de las características del tráfico rodado es el ambiente caótico en el que se desarrolla.

En un escenario poblado únicamente con ingenios, habiendo eliminado de la ecuación a los conductores humanos, el caos ambiental se reducirá notablemente, pero seguirá existiendo. La convivencia con peatones en las ciudades seguirá siendo un hecho muy relevante, ya que de manera no prevista tanto personas como objetos podrían interponerse en las trayectorias de los ingenios. Ocurre lo mismo en la navegación interurbana donde, además, se suma el riesgo de los animales salvajes, que en cualquier momento pueden irrumpir en las carreteras.

La percepción de estos entornos terrestres de navegación es fundamental, tanto para posibilitar la propia navegación autónoma, como para dotar al ingenio de la capacidad de



respuesta, ante estos fenómenos caóticos e imprevisibles. El subsistema de percepción estará apoyado por la información que recolecten los diferentes sensores equipados en el ingenio.

A pesar de las diferentes configuraciones de sensores que puedan tener los ingenios terrestres en función de su diseño, características y misión a desempeñar, se puede establecer una configuración de carácter genérico para los sensores principales, que posibiliten la navegación autónoma, según la Figura 5. 12. Estos sensores principales son:

- **LiDAR 360:** el entorno de navegación juega un papel crítico en el tráfico rodado. Se utiliza el LiDAR como tecnología de referencia en la generación de estos mapas tridimensionales. Es necesario que el ingenio tenga una visión de 360° de su alrededor, de manera constante. Una opción comúnmente empleada es un LiDAR de visión 360° en la parte superior del ingenio. La tecnología LiDAR se utiliza para numerosas funciones en la navegación autónoma, como son la generación y reconocimiento de entornos, el posicionamiento local, el seguimiento de objetos, la identificación, detección y seguimiento de objetos y elementos, entre otras.
- **Cámara de largo alcance:** la zona delantera del ingenio tiene una importancia muy elevada debido a que es la región del espacio que va a ocupar el ingenio en los instantes de tiempo inmediatamente futuros cuando se encuentre en movimiento. A elevadas velocidades cobra más relevancia aún, y por lo tanto el rango a analizar es mayor. Por este motivo se equipa una cámara de largo alcance, que cubra el área delantera. Las cámaras se utilizan en la navegación autónoma principalmente para la identificación y detección de objetos y elementos, como pueden ser otros vehículos, personas o marcas viales. Sirve de complemento a la información del LiDAR.
- **LiDAR perimétricos:** Obtener una visión de 360° alrededor de los ingenios es fundamental. La configuración de un LiDAR 360° en la parte superior podría dejar zonas ciegas de visión debido a la propia estructura del ingenio. Se equipan LiDAR perimétricos de menor alcance y rango de visión alrededor del ingenio para garantizar esta visión completa en todo momento. La seguridad es otro apartado fundamental, por lo que disponer de un sistema redundante resulta estratégico, para que en la situación de fallo de un sensor el sistema autónomo pueda seguir operando.
- **Cámaras perimétricas:** Al igual que ocurre con el LiDAR, es importante obtener un campo de visión de 360° con las cámaras. Por lo tanto, en función de la estructura del ingenio, se distribuirán de tal manera que se consiga este campo de visión.
- **Radar:** El radar se utiliza principalmente para el seguimiento de objetos. Se utiliza una combinación de radar de gran alcance y radar de amplio rango de visión en el frontal y laterales del vehículo con el objetivo de controlar determinadas maniobras, como incorporaciones a carriles o cruces.
- **Ultrasonidos:** se utilizan los sensores de ultrasonidos distribuidos por todo el perímetro del ingenio con el objetivo de detectar objetos muy próximos y colaborar en las maniobras de precisión o estacionamiento.

Esta configuración genérica se caracteriza por la redundancia en el campo de visión de los sensores empleados, que permite dotar al ingenio de la versatilidad y seguridad operativa ante cualquier tipo de avería. También se caracteriza por la variedad en el tipo de sensores empleados, que permite suplir las carencias y desventajas de una clase concreta de sensor,

o las debidas a las condiciones meteorológicas o reflejos. Sin perjuicio de esta configuración genérica, habrá ingenios que podrán resolver la navegación con distribuciones alternativas, incluso con nuevas tecnologías que se desarrollen en los próximos años.

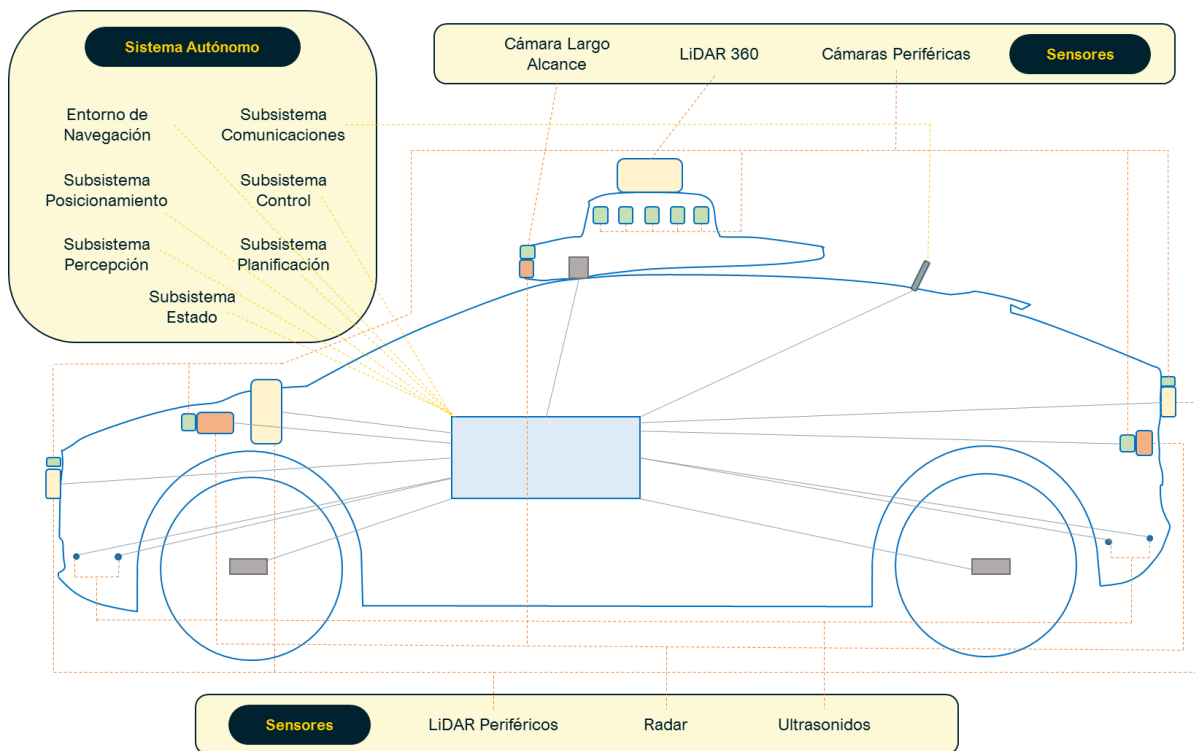


Figura 5. 12. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio terrestre.

El subsistema de control en los ingenios terrestres es responsable de la dirección, la aceleración y el frenado. La trayectoria local es generada por el subsistema de planificación y, una vez obtenida, el subsistema de control se encarga del cómputo de los comandos necesarios para que dicha trayectoria sea alcanzada. En el contexto de un ingenio completamente autónomo se deben considerar muchas tareas de control, como por ejemplo el control de estabilidad lateral, la navegación dentro de los límites del vial, evitar colisiones, etc. No obstante, no es suficiente con alcanzar estos objetivos, sino que hay que conseguirlo dentro de los límites del confort para los usuarios de los ingenios. En este aspecto y, gracias a sus avanzados sistemas de detección y planificación, los ingenios que utilicen un sistema autónomo podrán reaccionar con anterioridad ante la mayoría de imprevistos durante la conducción, disponiendo, de este modo, de un mayor tiempo para la realización de maniobras y permitiendo que estas puedan ser progresivas y suaves, resultado prácticamente imperceptibles para los ocupantes.

La implementación de estos sistemas autónomos ha de tener una serie de propiedades, desde el punto de vista del controlador:

- Capacidad en tiempo real: el algoritmo de control debe ejecutarse en una unidad de control embarcada, dentro de un tiempo de cálculo definido y garantizado.
- Parametrización: el ajuste de los diferentes parámetros de control debe ser sencillo.
- Estructura estandarizada: el controlador debe funcionar en diferentes ingenios de iguales características.
- Robustez: Debido a la existencia de incertidumbres en los parámetros, como cargas desconocidas o superficies irregulares de la carretera, y perturbaciones externas,



como la fuerza del viento lateral y la inclinación de la carretera, se debe garantizar un rendimiento robusto ante todas estas circunstancias.

- No linealidad: No debe existir dependencia de la velocidad del ingenio. El controlador debe funcionar desde 0 hasta, al menos, 130 km/h, en el supuesto de los ingenios de mayor velocidad operativa.

Existen diferentes esquemas de control para conseguir satisfacer estos requerimientos del subsistema de control [162].

1. Control PID. Es una técnica de control simple y muy común, que tiene en cuenta la variable de error (P como proporcional), la integral (I como integral) y la derivada de la variable de error (D como derivada). Existen varias reglas de ajuste para los parámetros en dichos controladores. La principal ventaja de este controlador es su aplicabilidad genérica, sin necesidad de conocer el modelo matemático. Sin embargo, la parte integral puede ser problemática y la parte derivada puede ser sensible al ruido de medición. Es un modelo que en muchos casos es superado por otros modelos de control.
2. Control Fuzzy. Es un esquema heurístico, un modelo similar a un controlador PID ya que emplea el error, su integral y derivada. El control difuso se aplica generalmente en sistemas donde no se conoce ningún modelo matemático o donde son difíciles de obtener. Es posible utilizar el controlador para dinámicas no lineales y sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas. Las variables de entrada se transforman en variables lingüísticas mediante el uso de funciones de pertenencia, mientras que la salida del controlador se elige en base a reglas difusas. El controlador actúa de manera similar al comportamiento humano. No obstante, el ajuste no es sencillo, y el análisis de estabilidad no es posible sin modelos matemáticos. Si el número de variables es elevado, puede volverse inmanejable.
3. Redes Neuronales. Las redes neuronales se aplican al control dinámico de vehículos. Con carácter general, están representados por un sistema de neuronas interconectadas, donde a cada conexión se le asigna un cierto peso que se ajusta en función de los datos de entrenamiento o de manera online. Este procedimiento genera una red adaptativa que es capaz de aprender. Se puede enseñar a la red a imitar la reacción del conductor si el conductor tiene en cuenta una fase de formación específica. El controlador se diseña en base al modelo que surge de este proceso. Los principales inconvenientes de esta técnica son la necesidad de datos de entrenamiento y la dificultad para explicar los fallos que se puedan ocasionar.
4. Regulador Cuadrático Lineal. Emplea un modelo de planta lineal y una teoría de control óptima para obtener un controlador de retroalimentación de estado óptimo. A diferencia de las anteriores estructuras de control, esta técnica necesita la información de un modelo de planta por adelantado, y señales reales de todos los estados durante la operación. Dado que esto no se proporciona de forma predeterminada, se debe implementar un observador de estado.
5. Linealización por Retroalimentación. Es una técnica común que hace que el sistema de lazo cerrado sea lineal con la ayuda de la compensación no lineal.
6. Control de Modo Deslizante. Es un modelo que se basa en un controlador de estructura, que es robusto respecto a una clase de incertidumbre específica de modelado y perturbaciones externas. Un conocido controlador de modo deslizante es el "algoritmo de superretorcimiento". Una desventaja de esta técnica es que se



deriva en tiempo continuo, pero su comportamiento en tiempo discreto depende en gran medida de la frecuencia de muestreo.

7. Control de Modelo Predictivo. En cada instante de tiempo se utiliza un modelo interno para predecir el comportamiento del sistema en un horizonte predefinido, donde se genera una secuencia de entrada de control óptima, que minimiza una determinada función de coste. Esta técnica permite considerar diferentes tipos de restricciones para estados y entradas, que es su gran ventaja. Por el contrario, su principal desventaja es la alta complejidad computacional, que es la razón de su escasa utilización en aplicaciones en tiempo real.
8. Control H_{∞} . Esta técnica intenta controlar una planta afectada por incertidumbres de modelado y variaciones de parámetros. Es necesario resolver un problema de optimización denominado norma H_1 de una función de transferencia particular del sistema de control. Esta función de transferencia está definida por el objetivo de control, la planta de los modelos de incertidumbre adicionales, las funciones de transferencia de ponderación y la matriz de control de retroalimentación, que es el parámetro de optimización. Sus ventajas son una estabilidad inherente robusta y un rendimiento robusto.

Las diferentes técnicas tienen sus ventajas e inconvenientes, la mejor solución se determinará para cada ingenio particular, intentando combinar las ventajas de los diferentes modelos, y basándose en la mejora continua de los procesos.

El diseño del subsistema de control de un ingenio autónomo se puede dividir en las siguientes tareas:

- Control longitudinal. Un enfoque muy extendido para controlar el comportamiento longitudinal del ingenio consiste en dividir el nivel del controlador en un bucle interno para el control del acelerador y el freno, y un bucle externo para el seguimiento de la velocidad o la aceleración.
- Control Lateral. Para el sistema autónomo esta tarea consiste en mantener al ingenio en el medio del carril durante todo su recorrido. Es una tarea de seguimiento, que ha de comparar la trayectoria deseada con la trayectoria realmente ejecutada.
- Control Combinado. Realizar un control combinado de los controles longitudinal y lateral es una tarea mucho más compleja que las estrategias anteriores. Pero resulta clave para conseguir optimizar el control del ingenio.

5.2.3.2. Sistema autónomo para ingenios aéreos

La navegación aérea se desarrolla en su práctica totalidad en el seno de un fluido, el aire, a excepción de las operaciones de despegue y aterrizaje que tienen lugar sobre la superficie terrestre. Volar implica la generación de la fuerza de sustentación que contrarreste la fuerza de la gravedad. Este ha sido el gran reto de la aviación, y es una característica que condiciona enormemente la navegación aérea. A diferencia de la navegación terrestre, una aeronave no puede detenerse en el aire en caso de avería o emergencia. La implementación de sistemas redundantes en aeronáutica tiene el objetivo de garantizar la operatividad ante cualquier avería. Esto afecta de igual modo a los ingenios aéreos.



La variedad en la tipología y características de los ingenios aéreos es grande, de acuerdo a lo analizado en el apartado 4.1.2. Hay aeronaves de tamaño muy pequeño con autonomías de unos pocos minutos que operan a velocidades de pocos km/h y altitudes de pocos metros, de igual modo que existen aeronaves de gran tamaño con autonomías de varios días, que operan a velocidades de cientos de km/h y altitudes de varias decenas de km. Al mismo tiempo, las aeronaves pueden ser de ala fija, de tipo multirrotor, o VTOL que combinan ambas configuraciones.

Un factor crucial en los ingenios aéreos es el peso, una cuestión importantísima en el diseño de toda aeronave. Esto afecta en gran medida a los sensores embarcados. Resulta de mayor relevancia, si cabe, en las aeronaves de menor tamaño. En la navegación terrestre y marina el peso no resulta un factor tan determinante como en el aire.

Existen varios métodos para resolver la navegación aérea, que se pueden agrupar en tres categorías principales: la navegación inercial, la navegación satelital y la navegación basada en visión. La navegación de muchos UAVs se ha basado en los sistemas satelitales (GPS) y los sistemas de navegación inerciales (INS). No obstante, estas soluciones de navegación presentan una gran problemática, y es que no pueden operar en regiones sin cobertura de GPS, como la exploración planetaria, en regiones montañosas o cañones, en zonas urbanas o en interiores.

Los métodos de percepción del ingenio se fundamentan en la información recolectada por el conjunto de sensores. Es importante recordar que las características del ingenio en cuestión tendrán una gran influencia para elegir los sensores que equipe. Entre estos se pueden destacar los siguientes:

- Sensores de navegación inercial: los avances recientes en estas tecnologías han permitido el desarrollo de ingenios aéreos de pequeño tamaño. Destacan tres tecnologías. Los giróscopos de anillo laser (RLG), los giróscopos de fibra óptica (FOG) y los sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) [163].
- Cámaras de visión: En comparación con otro tipo de sensores, las cámaras aportan información valiosa del entorno: el color, la textura, las formas, etc. Su reducido tamaño y coste han facilitado el desarrollo e implementación de estas tecnologías en aeronaves. Destacan cuatro tipos de cámaras de visión: Las cámaras monoculares, usadas especialmente en aplicaciones donde la compacidad y el peso mínimo son críticos. Las cámaras estéreo, que en realidad son dos cámaras monoculares montadas en una plataforma, que proporciona adicionalmente la doble vista permitiendo estimar un mapa de profundidad basado en el principio del paralelaje con ayuda de infrarrojos. Las cámaras RGB-D pueden obtener simultáneamente un mapa de profundidad y una imagen visible con la ayuda de sensores infrarrojos, pero se ven limitados por su alcance. Las cámaras de ojo de pez son una variante de las cámaras monoculares, que proporcionan un amplio ángulo de visión y son atractivas para evitar obstáculos en entornos complejos [164].
- LiDAR: de manera análoga a los ingenios terrestres, la combinación del LiDAR con las cámaras de visión permitirá al sistema autónomo la composición de los entornos de navegación.
- Sistema de datos del aire: compuesto por el conjunto de sensores que recogen los parámetros del aire imprescindibles para la navegación aérea, como la velocidad del aire, la presión o la altitud barométrica entre otros.

- Radar de apertura sintética (SAR): Es un sistema que permite ayudar a la navegación, cuando los sistemas inerciales proporcionan medidas poco precisas debido a problemas de señal con el GPS. Estos sensores se equipan en UAV del tipo MALE, que realizan vuelos de gran duración y acumulan errores importantes de medición. Además permiten equipar cargas de pago pesadas [165].

Las múltiples misiones que puede realizar un ingenio aéreo y sus respectivos diseños influirán sobremanera en los sensores empleados, sus características y su cantidad. Sensores como las cámaras o los LiDAR buscarán obtener una visión de 360 del entorno del ingenio, pudiendo equipar uno solo o varios, para conseguir este campo de visión. En la Figura 5. 13 se presenta una configuración genérica para un ingenio aéreo de ala fija.

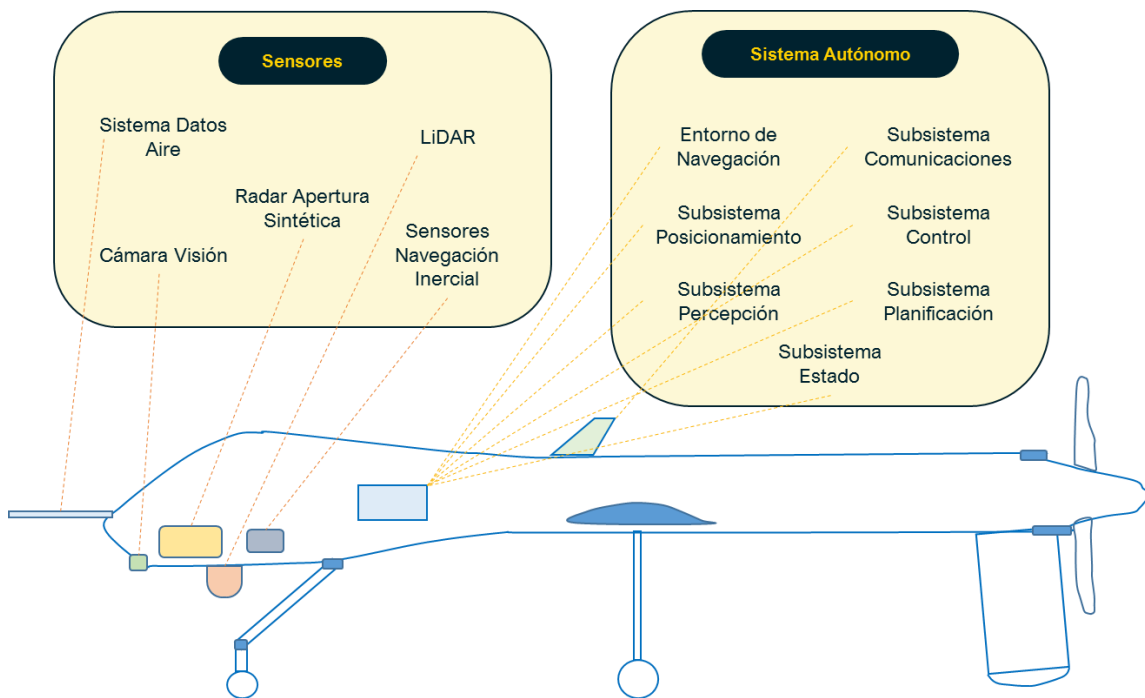


Figura 5. 13. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio aéreo con configuración de ala fija.

La detección de obstáculos ha sido una de las tareas más importantes en el desarrollo de los sistemas autónomos en cualquier contexto. En caso de los ingenios aéreos se presenta una particularidad, que no solo es necesario detectar obstáculos, sino que es necesario esquivarlos, debido a que no es posible detener la aeronave en el aire, como se podría realizar en tierra. Es un proceso conocido como “*sense and avoid*”, que implica la detección precisa de objetos y la realización de maniobras para evitar la colisión, bien sea una maniobra evasiva o un cambio de trayectoria.

El subsistema de control de un ingenio aéreo depende en su totalidad del diseño de la aeronave en cuestión. En una aeronave de ala fija, con un sistema propulsivo de hélice o chorro de aire, la aeronave se controla mediante la regulación del motor y las diferentes superficies de control distribuidas en la aeronave. En cambio, en un ingenio del tipo multirrotores, cuyo sistema propulsivo consiste en numerosos rotores, el control de la aeronave se realiza mediante la regulación individual de cada uno de estos rotores, para conseguir los movimientos en los tres ejes. En el caso de una aeronave VTOL, puede incorporar ambos sistemas propulsivos, los rotores verticales para el despegue y aterrizaje y el sistema propulsivo de hélice o chorro de aire para el vuelo en crucero. Su sistema de



control será mucho más complejo. Deberá incluir las técnicas de cada uno de ellos por separados y la fase de control de transición en la que el control será combinado.

5.2.3.3. Sistema autónomo para ingenios marinos

La navegación marina se caracteriza por desarrollarse en un entorno comprendido entre dos fluidos, el agua y el aire. Estas condiciones únicas tienen asociadas una serie de perturbaciones ambientales, como son vientos, olas y corrientes, además de verse afectada por nieblas marinas y el reflejo del agua. Circunstancias que afectan el desempeño del sistema autónomo y, por ende, su diseño.

La percepción del entorno marino es fundamental para dotar al sistema autónomo del ingenio de la situación de conciencia, y para esta tarea se requiere una configuración de sensores determinada. Se puede agrupar la percepción en dos métodos [63]. Percepción activa y percepción pasiva.

Los métodos de percepción activos, que actúan como sensores principales en la percepción de entornos marinos, formados por:

- LiDAR: Es la herramienta que presenta mejores prestaciones en la generación de mapas sobre vehículos en movimiento. Se aplica también en la identificación y detección de objetos sobre la superficie. Sus ventajas son: una gran detección de objetos en el corto alcance, una gran resolución y buena precisión. Los posibles inconvenientes del LiDAR son la existencia de ruido en los sensores, los errores de calibración y su sensibilidad al medio ambiente.
- Radar: El radar es un sensor tradicionalmente empleado en la navegación marina convencional, que representa la mejor opción para la detección de objetos y obstáculos a larga distancia. Los ingenios marinos equipan también la tecnología radar. El procesamiento de las imágenes del radar permite, además de la detección, el seguimiento de objetivos. Sus puntos fuertes son: el alto alcance de detección, su operatividad en casi todo tipo de clima y áreas amplias, y una resolución y precisión muy elevadas. Los inconvenientes del radar son: los datos sesgados en maniobras de giros rápidos, una limitada capacidad en la detección de objetos pequeños y dinámicos, y una alta susceptibilidad a las olas altas y la reflectividad del agua.
- Sonar: Es la tecnología que hasta la fecha representa la mejor opción para la recolección de datos en entornos submarinos. Las principales ventajas del sonar son: la ausencia de restricciones visuales y su elevada precisión y resolución. Por el contrario, se ve limitado por el rango de detección en cada escaneo y su gran susceptibilidad al ruido cerca de la superficie.

Combinando el uso de estos sensores se consigue suplir los inconvenientes o limitaciones de cada uno de ellos por separado, potenciando además sus ventajas, y convirtiéndose en los principales métodos de percepción de los entornos marinos.

Los métodos de percepción pasivos actúan de manera complementaria a los métodos activos, y se componen de:

- Cámaras de visión: Las cámaras de visión permiten obtener una imagen del entorno de navegación, y realizar un procesamiento del conjunto de imágenes para obtener

información útil. En entornos marinos, la estabilización de las imágenes es fundamental para resolver el problema de la deformación y el temblor, debido al movimiento del ingenio. Otro proceso necesario, debido al fenómeno marítimo de la niebla, es el desempañado de las imágenes, ya que puede causar una grave degradación de las mismas. La percepción de la información de las olas puede determinar el grado de la ola en diferentes condiciones de luz y estados del mar.

- Visión infrarroja: Las cámaras de onda larga infrarroja son ideales para hacer frente al impacto de varias condiciones de luz, como la niebla o la noche, permitiendo su funcionamiento día y noche. Otra de sus ventajas es el bajo consumo energético. Su principal problemática es su permeabilidad a las interferencias y la distancia.

Existen otros sensores empleados para la estimación del estado del ingenio, relativos al subsistema de posicionamiento. Las embarcaciones convencionales han equipado la clásica combinación del GPS con las unidades inerciales de medida (IMU), apoyadas en las medidas del compass o brújula, que les permite obtener una posición, orientación y velocidad estimadas. Los ingenios marinos combinarán estas tecnologías convencionales con las nuevas técnicas de posicionamiento explicadas anteriormente.

La distribución y configuración de estos sensores principales se determinará en el proceso de diseño de cada embarcación. En la Figura 5. 14 se presenta una configuración genérica de la distribución del sistema autónomo de un ingenio marino. La cantidad y localización exacta de los diferentes sensores se determinará de manera específica para cada embarcación. Los ingenios submarinos tendrán una serie de particularidades, debido a las condiciones específicas de los entornos subacuáticos. De igual modo, el sistema propulsivo y el casco empleados tendrán gran influencia en el sistema autónomo.

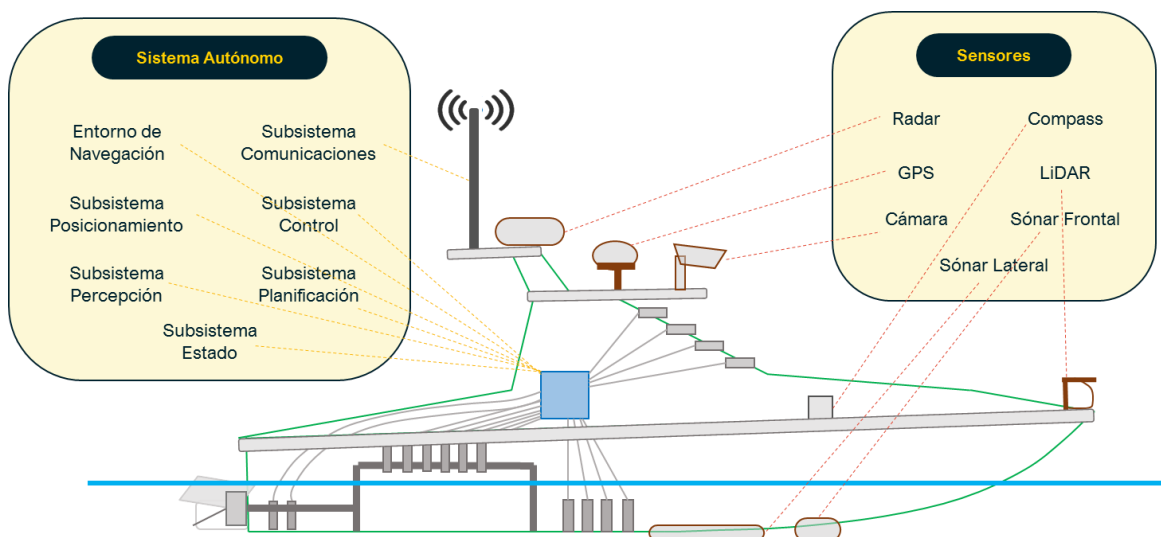


Figura 5. 14. Configuración genérica del sistema autónomo de un ingenio marino.

El considerable avance en las técnicas de control ha posibilitado la actuación de los ingenios marinos. El modelado del vehículo es la primera parte del control, ha de ser lo suficientemente preciso para permitir una metodología de control rigurosa y para realizar estudios en simulación. El modelo estándar del ingenio consta tanto de cinemática como de dinámica. La cinemática tiene el propósito primario de que el ingenio siga la ruta deseada de la manera más precisa. Los modelos cinemáticos por sí solos no son suficientes para el



modelado del movimiento del ingenio, por lo que se han de desarrollar también modelados dinámicos. Tienen especial interés cuando las embarcaciones presentan un deslizamiento lateral significativo. No obstante, aunque normalmente se requiere que un modelo preciso represente de la manera más fiel la física del mundo real, en el diseño del controlador sigue siendo inevitable realizar algunas simplificaciones.

Las técnicas de control se diseñan en función de diferentes objetivos. Las cuatro estrategias más frecuentes son las siguientes. En primer lugar, la conocida como “regulación del punto de ajuste”, que converge la posición y orientación del ingenio con los requisitos deseados, pero sin restricciones temporales. La segunda es el “seguimiento de trayectoria”, donde el ingenio se controla para seguir una referencia temporal deseada, mientras de manera simultánea obedece unas restricciones predefinidas. La tercera es el “seguimiento de ruta”, que requiere que el ingenio siga una ruta programada, mediante el seguimiento independiente de un perfil de velocidad de avance y dirigiendo su orientación. En último lugar, está la conocida como “maniobras de trayectoria”, que implica dos tareas. La tarea geométrica, que permite al ingenio seguir una ruta deseada factible bajo restricciones de maniobrabilidad, y la tarea dinámica, que requiere que el ingenio satisfaga algunos comportamientos dinámicos adicionales (como tiempo, velocidad y asignación de aceleración) a lo largo de la ruta deseada [63].

Desde una perspectiva práctica, el ingenio podría alejarse de la ruta predefinida, no solo debido a un diseño deficiente del controlador, sino también a las perturbaciones ambientales, las incertidumbres, la saturación del actuador, los acoplamientos fuertes, la infraactivación y los fallos del sistema. Son parámetros que hay que contemplar para conseguir un sistema autónomo fiable y seguro.



5.3. Red de comunicaciones

Los Centros de Control de Tráfico tienen la misión de la gestión automatizada del tráfico, los ingenios autónomos se encargan de realizar la acción última del transporte de personas y mercancías, pero falta establecer las comunicaciones entre los CCT y los ingenios para completar el proceso del sistema de transporte automatizado. La denominada Red de Seguridad al Cubo, o Red S3, es la infraestructura que establece las conexiones necesarias que posibilitan las comunicaciones entre ingenios y CCT.

Tradicionalmente los sistemas de transporte han construido infraestructuras propias en función de las necesidades de los diferentes vehículos, como pueden ser calles, carreteras, aeropuertos, puertos, etc. Infraestructuras que por lo general tienen un coste muy elevado y requieren de un mantenimiento que supone a su vez costes poco despreciables. El sistema de transporte automatizado necesita también su infraestructura específica, como son los CCT y la Red S3, que requerirán de una inversión importante, pero será muy inferior a las tradicionales, tal y como se analizará más adelante en esta tesis.

La infraestructura necesaria para implementar un sistema de movilidad autónomo no consiste en construir más carreteras, puentes, túneles, etc. La clave está en añadir una “capa de inteligencia” a las infraestructuras existentes. Si a la infraestructura actual no se le añade esta nueva capa de inteligencia, quedarán obsoletas y no serán aptas para la navegación de ingenios autónomos. En definitiva, la construcción de esta capa de inteligencia consiste en desplegar la Red S3 a lo largo de las infraestructuras de transporte del territorio nacional.

Recientemente se han popularizado conceptos como el “vehículo conectado” que abogan por establecer comunicaciones con los vehículos en circulación para diferentes tareas. En algunas ocasiones se refiere a comunicaciones entre vehículos (denominadas V2V), pero en la gran mayoría de casos son iniciativas que pretenden utilizar redes actuales de comunicación para conectar al conductor o al pasaje con Internet. Es muy importante dejar estas ideas muy claras. Una cuestión es el “conductor conectado” y otra bien diferente es el “ingenio conectado”. No se parecen en nada, los requisitos de un tipo de comunicación y otra difieren notablemente.

La Red S3 se define como una red de comunicaciones dedicada exclusivamente al transporte, que incorporará, a su vez, el conjunto de servicios que necesita la movilidad automatizada. En este apartado se analizan con detalle las redes convencionales de comunicaciones y el nuevo paradigma que representan las comunicaciones en el sistema de transporte automatizado.

5.3.1. Redes de comunicaciones en la actualidad

El transporte es uno de los pilares básicos en la economía de cualquier país, al igual que lo son las redes de comunicaciones actuales, dado su gran potencial y la gran capacidad de conectividad que ofrecen (persona-persona, objeto-objeto, persona-objeto, etc.).

Con la irrupción de las redes de alta velocidad se ha abierto un abanico de nuevas posibilidades, tanto para la industria como para los usuarios, donde la aparición de nuevos



servicios será lo primordial. Estos nuevos servicios necesitan cada vez mayores y mejores requerimientos, en aspectos como la latencia, el ancho de banda, las comunicaciones masivas, la conectividad, la rentabilidad, el bajo consumo de energía, coste, etc.

Surge la siguiente pregunta: ¿por qué estos nuevos servicios no se pueden ofrecer en las redes tradicionales y actuales? Uno de los principales problemas de las redes actuales es la rigidez que presentan, dado que están diseñadas, la mayoría de ellas, para un solo uso (poseen una estructura monolítica), además de no permitir la escalabilidad dinámica, no posibilitan realizar cambios durante la ejecución, ni un manejo del tráfico centralizado, es necesario configurar cada elemento de manera manual (lo que es más propenso a errores) y la subsanación de sus errores es más compleja. Realizamos un análisis más profundo.

Los servicios que se diseñan actualmente poseen grandes conjuntos de datos para analizar (denominado *Big Data*), lo que permite a las empresas poder tomar mejores decisiones. Las redes actuales que dan soporte a estos servicios a menudo quedan “saturadas”, son sometidas a mayor “estrés” dada la cantidad de datos necesaria para el procesamiento paralelo masivo que se ejecuta en miles de servidores. A esto hay que añadir que los recursos informáticos de los servidores, algunas veces, se asignan a una sola tarea o finalidad de manera completa, aunque no se ocupe totalmente. Tradicionalmente, las redes se diseñaban para poder satisfacer las “tasas de tráfico pico”, lo que impide la correcta optimización de los recursos de la red.

La configuración de los elementos que componen las redes se realiza a través de líneas de comandos o interfaz GUI/consola, lo que requiere mayor tiempo de configuración, ya que es necesario ir uno a uno configurando todos los dispositivos, lo que significa una mayor complejidad para el administrador o administradores de la red y es mucho más propenso a errores y mucho más complicado localizarlos y corregirlos. La escalabilidad de las redes actuales en ocasiones también es un problema. En ocasiones, cuando es necesario que una red (aunque presente un modelo distribuido) aumente de tamaño, el aprovisionamiento y la configuración de todos los nodos que se incorporan también se debe realizar de manera manual, lo que limita la operatividad. Es importante destacar que, muchos de los dispositivos que se utilizan en las redes actuales no siguen las recomendaciones necesarias, es decir, no implementan o programan de manera adecuada los estándares, normas o protocolos correspondientes, lo que hace aún más insegura su conexión y más complicado de predecir su comportamiento.

La multitud de servicios que aparecen y que irán apareciendo supone que existirán varios operadores, por lo que serán necesarios diferentes ecosistemas que los soporten y gran cantidad de dispositivos que permitan su funcionamiento. La gran cantidad de protocolos y funciones de red que existen actualmente aumentan la complejidad de la red, las cuales son concebidas para las características específicas de un proveedor y se adaptan o ponen “parches” para adaptarse a otras.

Los servicios de nueva generación que demandan características de almacenamiento y/o ejecución en la nube son cada vez más habituales. Por lo que es necesario una red adaptada y preparada para su proceder. La ejecución de aplicaciones en la nube requiere grandes dosis de velocidad y de automatización, además de la simultaneidad de usuarios y escalabilidad soportando picos en la demanda.

Las redes que ofrecen entornos de la nube están compuestas por multitud de aplicaciones elementales y virtualizadas, además de las infraestructuras físicas y virtuales. El



mantenimiento de estos elementos es costoso y la actualización de las políticas de QoS (de seguridad o de calidad de servicio) y reglas que mantiene el sistema también. Es habitual encontrarnos con que las actualizaciones solo se aplican a una clase particular de dispositivos o a una infraestructura virtual concreta. También podemos encontrarnos con que existan políticas asociadas a aplicaciones que ya han sido eliminadas, ya que es muy costoso en términos de tiempo y complejidad eliminarlas por completo.

Para poder mantener la demanda de usuarios y aplicaciones, los proveedores de servicios están invirtiendo en grandes gastos operativos, para poderse mantener al día y poder satisfacer esta gran demanda.

Actualmente existen un sinnúmero de redes, cada una con sus particularidades, que podemos clasificar de diferentes modos:

- Por alcance: PAN, LAN, CAN, MAN, WAN, SAN, VLAN, etc.
- Por conexión: guiado (coaxial, fibra, etc.), no guiado o inalámbrico (wifi, radio, infrarrojos, etc.).
- Por topología: en bus, en anillo, anillo doble, estrella, estrella extendida, malla, árbol, red celular, irregular, mixta, etc.
- Según el propietario de la red: privada, pública, híbrida, etc.
- Por servicio: educativa, comercial, de proceso de datos, etc.
- Por la tecnología de transmisión: *broadcast*, *point-to-point*, *point-to-multipoint*, etc.
- Por la transferencia de datos que soportan: transmisión simple, *half-duplex*, *full-duplex*, etc.
- Por grado de difusión: Intranet, Internet, etc.
- Por el método de transferencia: circuitos, paquetes, etc.
- Por naturaleza de la señal: digital, analógica, etc.
- Por distribución lógica: cliente/servidor, *peer to peer*, etc.
- etc.

Todo ello hace que la coexistencia y compatibilidad entre ellas sea cada vez más compleja, ya que cada una tiene unas características definidas y particulares, y siguen unos estándares, normas y protocolos adecuados para ellas. La rigidez que presentan las redes al configurarse de manera manual, unido a la continua aparición de nuevas formas de programación, de nuevos dispositivos con nuevas funcionalidades, nuevos programas o lenguajes y nuevas aplicaciones, hace que el ritmo de mantener siempre actualizada las redes y que sigan siendo compatibles con otras redes de otro tipo y menos actualizadas (o con otro tipo de sistemas como servidores), sean tareas tediosas e imposibles de llevar a cabo. Al final, nos encontramos con una “coalición de sistemas”, donde los elementos se han desarrollado de manera independiente y se unen para lograr un objetivo, pero no han sido diseñadas explícitamente para trabajar juntas, sino que tienen elementos de interés. Para interactuar entre sí, utilizan protocolos acordados o interfaces. Los sistemas a veces no trabajan de manera colaborativa, sino “de mala gana” porque se necesitan. Al no existir un coordinador general, las coaliciones se pueden romper si un sistema cambia, por ello no son confiables (solo necesitan cumplir estándares para comunicarse y no existe una autoridad que rija el acuerdo). El problema de estos sistemas no es de compatibilidad si no de pretender entender realmente la información que se intercambian las individualidades. En los sistemas de coalición no tenemos una entidad organizadora de sus comportamientos, ni han sido diseñados los elementos individuales específicamente para



el sistema global que se quiere construir. Lo que nos lleva a que, aunque los elementos individuales cumplan los estándares de comunicación, no significa que conozcamos su completo funcionamiento (muchas veces se desarrolla o programan de manera general para múltiples funcionalidades), lo que nos puede llevar a errores inesperados.

Por lo tanto, podemos observar que las redes actuales o tradicionales están formadas por elementos de la red con elevado coste y que no permiten ser personalizados internamente.

Anteriormente, la manera de poder satisfacer el aumento de la demanda y de las necesidades de banda ancha pasaba por añadir más y más hardware con todo lo que ello supone (costes entre otras cosas). Es condición indispensable que las redes de hoy sean escalables para poder adaptarse a la gran cantidad de trabajo que es necesario, en la menor cantidad de tiempo posible y con la mayor agilidad, tratando de mantener bajo el coste. Para ello, entre otras cosas, es necesario una virtualización del servidor que permita distribuir los recursos de manera eficiente.

La solución a todos estos problemas se consigue en gran medida con la automatización de la infraestructura, abarcándola por completo, y de los procesos, donde el software toma forma y acelera los procesos y las órdenes que se envían.

5.3.1.1. Tecnologías de comunicación para vehículos autónomos

En el marco de las redes actuales de comunicación, existen trabajos y desarrollos específicos para las diferentes tecnologías de comunicación con vehículos autónomos. El análisis del estado del arte, realizado al comienzo de la tesis, pone de manifiesto los importantes desarrollos que se han realizado en las últimas décadas en el sector de los vehículos autónomos. Muchos de estos desarrollos se centran en las tecnologías de comunicación para dichos vehículos. En este apartado se realiza un análisis de las mismas en los diferentes contextos.

5.3.1.1.1. Tecnologías de comunicación en vehículos autónomos terrestres

Las comunicaciones relacionadas con los vehículos terrestres se han enmarcado tradicionalmente dentro de los sistemas de transporte inteligentes (ITS). Actualmente, en la conducción autónoma existen dos corrientes principales en cuanto a las comunicaciones de estos vehículos, el WiFi y el 5G. El nombre técnico para las comunicaciones de WiFi es DSRC (*Dedicated short-range communications*). Para el 5G el nombre es C-V2X (*Celular-vehicle to everything*) [166].

DSRC. El estándar WiFi basado en comunicaciones de rango corto tiene una larga trayectoria, por lo que ha sido suficientemente probado y estandarizado. Además, ya está disponible, es gratuito y fácil de implementar. Este tipo de comunicaciones están basadas en el protocolo IEEE 802.11p, que en Europa se conoce también como ITS-G5.

Este tipo de comunicación se denomina DSRC, y ha sido el protocolo más extendido hasta ahora para poder realizar la comunicación V2V y V2I. Actualmente tiene 75 MHz en la banda de 5.9 GHz con 5 MHz antes y 7 canales de 10 MHz [167].



C-V2X. El 5G es la próxima generación de la tecnología del 4G, está más adaptada a una comunicación rápida, que permita evitar los accidentes y prever el tráfico. Es una tecnología que ha recibido un importante apoyo de países como Estados Unidos y China, considerándola como la piedra angular de una guerra comercial y dictaminando que será el futuro.

El 5G permite conectar a los dispositivos con el entorno, además de transferir datos de tráfico y datos para la navegación del vehículo conectado. Es muy importante no confundir el concepto de vehículo conectado con vehículo autónomo. En la mayoría de ocasiones el término correcto para lo que se llama “vehículo conectado” sería “conductor conectado”. Proporcionar conexión a Internet para el conductor o el pasaje no tiene nada que ver con las comunicaciones de un ingenio autónomo, como se expone en este capítulo de la tesis.

Hay que tener en cuenta que el 5G no es un tipo de red de comunicaciones sino un conjunto de estándares. Es el conjunto de frecuencias y métodos que facilitarán los próximos avances tecnológicos y objetivos en banda ancha móvil y telefonía. En el marco de los estándares 5G, será necesario analizar las frecuencias que se utilizarán, los objetivos mínimos de calificación para el rendimiento, la latencia (retraso de la señal) y las tecnologías que se implementarán, entre otros asuntos.

Las frecuencias en las que se encuentra el 5G son: 700 MHz, 1,5 GHz-3,6 GHz, 26 GHz. La de 3,6 GHz tiene dueño, y son las operadoras de telefonía. Las otras dos bandas, a día de hoy, no tienen operador.

La realización actual de C-V2X es LTE-V2X y abarca dos interfaces [168]:

1. La interfaz LTE de red de área extensa (Uu), que conecta dispositivos y vehículos de usuarios finales a estaciones base (eNB) y la red central, para proporcionar servicios de vehículo a red (V2N). LTE-V2N puede ser soportado por un espectro armonizado y designado para redes de comunicaciones móviles;
2. La interfaz de comunicaciones directas (PC5) que conecta los vehículos a los vehículos (V2V), a la infraestructura de carretera (V2I) y a los peatones (V2P), para la prestación de servicios V2V/I/P de baja latencia y alta confiabilidad, independientemente de cualquier MNO relación y disponibilidad de red celular. LTE-V2V/I/P puede ser compatible con un espectro armonizado para ITS, es decir, 5,9 GHz en Europa. El modo de comunicación directa no requiere cobertura por una red celular o una conexión V2N.

Las primeras regularizaciones para este tipo de comunicaciones se realizaron en el marco de los sistemas de transporte inteligentes (ITS), cuando en octubre de 1999 la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (FCC) asignó 75 MHz de espectro en la banda de 5,9 GHz para los sistemas ITS [169]. En Europa fue en agosto de 2008 cuando el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) asignó 30 MHz de espectro en la banda de 5,9 GHz para estos sistemas [170].

La tendencia general ha sido realizar comparativas entre ambas tecnologías, mostrando sus ventajas e inconvenientes, con el objetivo de forzar una decisión y decantarse por una de las dos. Sin embargo, recientes estudios defienden la coexistencia de ambas en el mismo rango de frecuencias [171], [172].



Existen estudios e investigaciones recientes que abogan por la utilización de ondas milimétricas, conocidas como *millimeter wave* (mmWave), que se presentan como una banda de frecuencias prometedoras para la próxima generación de redes inalámbricas para comunicaciones V2X de banda ancha, debido a los grandes recursos de espectro disponibles. Tiene un gran potencial para lograr velocidades de datos más allá de los gigabits por segundo, superando significativamente las posibilidades de los sistemas celulares tradicionales, que operan en bandas por debajo de los 6 GHz [173]. Estos avances se están realizando en bandas de frecuencia de 28 GHz [174], e incluso superiores, en los 60 GHz [175].

5.3.1.1.2. Tecnologías de comunicación en vehículos autónomos aéreos

El sector de las aeronaves no tripuladas, de acuerdo a lo analizado a lo largo de esta tesis, ha tenido el mayor desarrollo comparado con los ámbitos terrestre y marino. La concepción de aeronave no tripulada incluía desde un comienzo la existencia de un piloto en tierra, motivo por el cual las comunicaciones han sido una parte crucial en cualquier UAV.

La capacidad de comunicación de una aeronave se ve afectada por la altitud, el alcance, la sensibilidad del receptor, la potencia del transmisor, el tipo de antena, el tipo coaxial y la longitud, así como los detalles del terreno.

Existen diferencias notables entre las comunicaciones de los UAV y las comunicaciones aeronáuticas comerciales, al mismo tiempo que presentan alguna similitud. La mayoría de las mediciones de canales para las comunicaciones aeronáuticas comerciales utilizan aeronaves tripuladas, que requieren de aeropuertos para el despegue y aterrizaje. Este tipo de canal sienta las bases para las comunicaciones de los UAV, mucho de los cuales, especialmente en aplicaciones militares o industriales, requieren y están ubicados en aeropuertos. En el caso de las aeronaves no tripuladas, existe una gran variedad de operaciones posibles, desde pequeñas aeronaves que tienen un alcance de unas decenas de metros, hasta aeronaves con alcances de cientos o miles de kilómetros. Los canales de comunicación deben adaptarse a las peculiaridades de cada tipo de misión que se realiza.

Recientemente, con el crecimiento de las aplicaciones civiles de las aeronaves no tripuladas, se ha intensificado el trabajo en redes de comunicación específicas. Las investigaciones iniciales exploraron la aplicación del trabajo realizado en redes móviles ad hoc, o MANETs (Mobile Ad hoc Networks) y redes vehiculares ad hoc, o VANETs (Vehicular Ad hoc Networks), pero los trabajos en estas áreas no abordan completamente las características y requisitos específicos para las redes de aeronaves no tripuladas o autónomas.

Los modelos de movilidad son una de las características únicas de los UAV, que pueden desplazarse de manera organizada o aleatoria no solo en dos dimensiones, como los vehículos terrestres, sino en tres dimensiones. Los cambios en la topología son mucho más frecuentes. Los enlaces de comunicación podrían establecerse y desvanecerse debido a los cambios en la posición de los nodos de red. Las restricciones energéticas en el consumo de la tecnología de comunicaciones son críticas, especialmente en los UAVs de menor tamaño. En el caso de una red para múltiples aeronaves, que sea completamente autónoma, requiere de una red robusta entre aeronaves que permita la cooperación, para mantener la red organizada incluso en caso de fallo de enlace o de un nodo. Este tipo de



red requeriría cambios en las capas de control y de red, y tendría capacidades de auto organización, siendo tolerante a los retrasos, con un control más flexible y automatizado a través del software y empleando mecanismos de ahorro de energía en las diferentes capas [176].

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) establece que los enlaces de control y las comunicaciones sin carga de pago, denominadas CNPC (*Control and nonpayload communications*), deben operar sobre espectro protegido. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), para regular las aplicaciones de los UAV ha permitido el uso de ciertas partes de la banda L: 960 MHz – 977 MHz, y de la banda C: 5030 MHz – 5091 MHz para los enlaces CNPC. La banda Ku de enlace de descarga: 10,95 GHz – 12,75 GHz, y enlace de subida: 14,0 GHz – 14,47 GHz. Para operaciones más allá del rango visual o BLOS (*Beyond line-of-sight*) están autorizadas para el espectro CNPC de comunicaciones de seguridad aeronáutica por satélite en la banda Ka de enlace de descarga: 19,70 GHz – 20,20 GHz, y de enlace de subida: 29,5 GHz – 30 GHz [177].

Algunos investigadores defienden la necesidad de reconstruir desde cero las redes de comunicación para las aeronaves no tripuladas. Esto incluye características en la capa física, la capa de enlace de datos, la capa de red y la capa de transporte. Algunas cuestiones, como la conservación de la energía y la garantía de una calidad de servicio adecuada, requieren un diseño de capas cruzadas [176].

5.3.1.1.3. Tecnologías de comunicación en vehículos autónomos marinos

Los mecanismos que gobiernan la propagación de señales de ondas de radio en entornos marítimos son complejos y dependen de numerosos factores atmosféricos, como la temperatura, la humedad y la presión. A medida que las ondas electromagnéticas se propagan a través de la atmósfera, experimentan refracción y, particularmente en la banda C y superiores, atenuación por lluvias y absorción gaseosa. Estos efectos alteran la orientación de los frentes de ondas electromagnéticas y provocan la convergencia o divergencia de la energía de radiofrecuencia [178].

Establecer enlaces de comunicación continuos con submarinos autónomos (AUV), mientras están realizando una misión, representa un reto complejo. Un enlace de comunicación continuo está motivado por la detección de fallos, las actualizaciones en el plan de la misión y la presentación de datos en tiempo real. Una solución frecuentemente empleada es la comunicación acústica, pero se ve limitada por el rango y el ancho de banda, donde el ancho de banda disminuye a medida que aumenta el rango. Para ampliar este alcance y mejorar el enlace acústico se suele emplear una embarcación de superficie (USV) para transmitir datos, bien por satélite o bien a través de otra forma de comunicación inalámbrica [179].

Existen cuatro tipos de configuraciones de comunicaciones: punto-punto, punto-multipunto, multipunto-punto y red de malla. Las configuraciones distintas requieren de diferentes rendimientos de comunicación. El control cooperativo descentralizado comparte información entre las embarcaciones autónomas, lo que plantea numerosos desafíos, incluido el ancho de banda de comunicación limitado, el ruido de transmisión, demoras, interrupciones y fallos de comunicación. Según la capacidad de cobertura que presentan, las técnicas de comunicación inalámbrica aplicables a las embarcaciones no tripuladas o



autónomas se pueden dividir en métodos de corto alcance y métodos de largo alcance. Los métodos de comunicación inalámbrica de corto alcance aplicados en embarcaciones no tripuladas o autónomas son Bluetooth, Zigbee, Ultra WideBand, WiFi y radiofrecuencia. Los métodos de comunicación inalámbrica de largo alcance para estas embarcaciones incluyen el WiFi de alta ganancia, GPRS, 3G, WiMAX y LTE [180].

En la práctica, si la embarcación no tripulada adopta un esquema de transmisión de datos en tiempo real, su rango operativo se verá limitado por la distancia de la comunicación inalámbrica. Los métodos de comunicación punto a punto pueden transmitir hasta varios km, y una red 4G puede cubrir unos 10 km de costa. En muchos de los desarrollos e investigaciones realizadas con USVs se escoge 2,4 G WiFi para las comunicaciones de corto alcance y 4G para las comunicaciones de largo alcance [180].

Las comunicaciones para este tipo de embarcaciones se ven afectadas por el menor grado de desarrollo del sector, en comparación a sus homólogos aéreos y terrestres. Es necesario aún realizar mucho trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, que se vea posteriormente respaldado por la regulación, para establecer protocolos y estándares unificados de comunicación en el ámbito marítimo.

5.3.2. Funcionalidades y requisitos de la Red S3

La Red S3, propuesta en esta tesis, es una red de comunicaciones dedicada en exclusiva al transporte y tiene la misión principal de establecer y garantizar las comunicaciones entre los diferentes elementos y agentes del sistema de transporte automatizado, pero además ha de integrar otra serie de servicios. Esta infraestructura debe tener la capacidad de integrar múltiples servicios en una sola red, permitiendo su soporte e intercambio de información.

Es necesario que la Red S3 garantice una calidad de servicio para cada uno de ellos, que permita asignar distintos niveles de prioridad, una movilidad total, una unificación en los servicios fijos y móvil, etc. De modo que, la red tendrá que ser totalmente ubicua, además de presentar un origen centralizado de la gestión de la misma.

El camino de la unificación de los servicios en una sola infraestructura pasa por la convergencia de la misma. Es fundamental que tanto los usuarios como los operadores o desarrolladores posean una visión conjunta y transparente para poder obtener beneficios de ello.

A la hora de diseñar la Red de Comunicaciones, es necesario lograr la máxima flexibilidad y tratar de conseguir la menor dependencia con infraestructuras, servicios, operadores o clientes. Hemos de entender la infraestructura de la red como un ente independiente, con una inteligencia propia, que no depende del hardware implementado (esto se consigue gracias al hardware genérico).

El diseño de la Red S3 se realiza en base a sus dos objetivos principales, de una importancia crítica para el correcto funcionamiento del sistema de transporte automatizado, que son:

1. Garantizar las comunicaciones. Tiene que asegurar la conexión permanente entre los ingenios y de los ingenios con el CCT.



2. Obtener la posición de los ingenios. Tiene que calcular la posición de todos los ingenios que naveguen de manera autónoma con gran exactitud.

Estos dos objetivos se toman como punto angular en el diseño de la Red S3, y en base a ellos se realiza la definición del resto de funcionalidades y requisitos que ha de cumplir. Son los siguientes:

- Seguridad. Como se deja claro en el propio nombre de la red, garantizar la seguridad es crítico. Un sistema que gestiona ingenios autónomos que transportan mercancías o personas no puede ser vulnerable, ya que el potencial daño que podrían ocasionar estos ingenios es muy elevado. Para ello se parte de un diseño de red específico para la movilidad autónoma, con unos requisitos tanto de seguridad física como de ciberseguridad de muy alto nivel.
- Segundo testimonio. La combinación de los dos objetivos principales de la Red S3, como son establecer las comunicaciones y obtener la posición de los ingenios, permite generar un nuevo título jurídico, el “Segundo Testimonio”, al igual que ocurría con el “Tercero Autorizado” en el CCT. Gracias a esta figura la Red S3 podrá ofrecer una segunda versión de la posición de los ingenios en cada momento, de manera independiente a la información que proporciona cada ingenio. Desde el punto de vista judicial supone un gran salto cualitativo en materia de certificaciones e investigaciones.
- Comunicación N2N. La comunicación de la Red S3 se establece entre las geobalizas que la conforman, denominada N2N (Network to Network). Soporta todo el tráfico según la demanda en cada momento y conecta los elementos físicos, que soportan los flujos de datos. La infraestructura se caracteriza por formar una arquitectura estática, es decir, se conoce en todo momento la ubicación de los dispositivos que la forman.
- Estructura jerárquica. Como norma general, no se limitará la inteligencia de los dispositivos que compongan la Red S3, pero sí la capacidad de decisión. Es una filosofía común en todo el sistema de transporte automatizado, cuanto más inteligentes sean los diferentes dispositivos, mejor podrán desempeñar su cometido, pero las decisiones que puedan tomar, o en su defecto el número de tareas que puedan desempeñar estará sometido a una estructura jerárquica perfectamente definida y acotada.
- Evolución por delante de la demanda. La Red S3 está diseñada para contar con las herramientas que le permitan evolucionar por delante de la demanda, de forma que pueda garantizar en todo momento la calidad del servicio, sin verse afectada por picos de uso o saturaciones del sistema. Esto repercute directamente en la experiencia final de los usuarios del sistema.
- Uniformidad. La red funciona de manera transparente para el hardware que está por debajo, es decir, que soportará la unificación tanto de redes inalámbricas como cableadas. Esta uniformidad permite reducir los costes operativos y la complejidad en la administración.
- Escalabilidad. La red ha de ser escalable, pudiendo incorporar o reducir capacidad de manera sencilla, adaptándose a las necesidades cambiantes del tráfico.
- Control centralizado. El control y gestión de la Red S3 se realiza de manera centralizada. Las tareas de administración de la red y las actualizaciones de políticas son procesos que se automatizarán.



- Red independiente. La Red S3 se diseña como una red dedicada de uso exclusivo para la movilidad automatizada. Los elementos físicos que la forman no se conectan de manera directa a Internet por razones de seguridad.
- Nube. Las redes que tienen el plano de control y el plano de datos separados permiten que los centros de datos sean más eficientes, rápidos y seguros. Por tanto, este tipo de redes utilizan software y tecnología basada en la nube, con el objetivo de conseguir la abstracción en la red, consiguiendo rapidez, calidad, confiabilidad, seguridad y de responder de manera dinámica ante las diferentes condiciones.
- Servicios en la nube. Los Centros de Control de tráfico se comportan al fin y al cabo como una nube, tienen sus servicios virtualizados y accesibles desde cualquier lugar con cobertura de la Red S3.
- Reglas. Las políticas que se generen especificarán cómo debe comportarse la red ante diferentes situaciones. No se controlará cada dispositivo, ya que estos son lo suficientemente inteligentes como para ejecutarlas, es decir, especificará las reglas de comportamiento y son los elementos los que se comportarán según esas reglas. De esta manera, las políticas son mucho más fáciles de cambiar y auditar
- Estandarización. Es fundamental la generación de estándares comunes en el conjunto de elementos que formen parte del sistema (dispositivos, servidores, almacenamiento, servicios, etc.) debido a la gran cantidad de agentes y actores que se verán involucrados. El objetivo es conseguir un lenguaje unificado.
- Ubicuidad. La red ha de ser ubicua dentro de los entornos en los que esté desplegada. Tiene que poseer un alto ancho de banda, que permita satisfacer la demanda de las aplicaciones o servicios relativos a la movilidad automatizada. La infraestructura tiene que ser confiable y adaptarse a las necesidades de cada operador, tanto en sus características de hardware como de software.

El diseño de la red que permita satisfacer todos estos requisitos y funcionalidades, para el correcto funcionamiento del sistema de transporte automatizado, debe tener un carácter totalmente flexible y multiservicio.

Uno de los pilares más importantes de esta red consiste en la virtualización de la misma, es decir, una filosofía en la que existan programas que ejecuten diferentes funciones en lugar de máquinas que ejecuten diferentes funciones (como ocurre en las redes tradicionales). En esta estructura es importante permitir la segmentación de la red en diferentes redes virtuales destinadas a cumplir una funcionalidad específica acorde al servicio que debe prestar.

La capacidad de dividir la red creando subredes es muy importante. Estas subredes permiten ofrecer unas características más ajustadas a las necesidades y requisitos concretos de cada uno de los servicios. De esta forma se pueden adaptar las exigencias de cada tipo de dispositivo que compone la Red S3 a cada uno de los casos de uso. Esta división supone otro gran avance respecto a las infraestructuras antiguas, ya que permite asegurar que los servicios indispensables como emergencia u otros, tengan siempre garantizadas sus prestaciones. Es decir, aunque la red se encuentre saturada podemos garantizar la incorporación de los dos servicios principales, las comunicaciones y el posicionamiento, además de otros servicios.

El diseño de esta arquitectura de red implica la aplicación de dos técnicas importantes, como son SDN y NFV.



5.3.2.1. Software Defined Network (SDN)

La Red S3 se caracteriza por estar virtualizada, emplea una arquitectura de red definida por software o Software Defined Network (SDN), separando el plano de control, la inteligencia de la red (eliminar/modificar/añadir caminos, cálculo de caminos y de enrutamiento e información a intercambiar, descubrir la topología y control del estado de los enlaces) del plano de datos, los datos reales de los usuarios (reenvío de tráfico al siguiente salto según lo diseñado por el otro plano, eliminación de paquetes, tramas y salientes en función de lo acordado por el plano de control). De esta manera se consigue eliminar la dependencia del hardware utilizado. Además, esta tecnología permite que la infraestructura se convierta en moldeable, desplegando funciones bajo demanda de forma rápida y eficiente.

El objetivo de esta desagregación es crear una red que se gestione de forma centralizada y sea programable. Estas redes son mucho más baratas que las tradicionales (hasta dos veces) y mucho más robustas, de manera que la gestión de las funciones instaladas es mucho más simple.

En una estructura SDN, según la normalización OSI [181], las capas a las que afecta su virtualización son la capa de red y la capa de enlace de datos.

Con SDN se realiza ingeniería de tráfico, desacoplando el software del hardware. Estos recursos virtuales llevan a cabo las funciones que tradicionalmente realizaba la infraestructura en las redes más antiguas. Con este nuevo planteamiento, la red simplifica la creación, gestión y modificación de las redes. Las redes definidas por software (SDN) poseen distintas capas que se comunican entre ellas a través de APIs o protocolos. Tres capas:

- Aplicaciones o Servicios: Programas que ofrecen prestaciones a los demandantes y que comunican sus necesidades, requisitos o características esenciales (ancho de banda, latencia, etc.) del SDN. Esta capa permite a sus aplicaciones comunicar sus necesidades a la capa inmediatamente anterior (capa de control) a través de APIs programables.
- Control: La inteligencia propia de la red que permite la configuración de los diferentes elementos que la componen. Es donde se agrupa al SDN Controller. Esta capa se comunica con su inmediatamente anterior (capa de infraestructura) a través de un interfaz.
- Infraestructura: La interconexión de los elementos físicos.

Las redes definidas por software permiten la incorporación de redes superpuestas, es decir, redes virtuales (separadas lógicamente que comparten nodos interconectados y una infraestructura física), que permiten la convivencia de diferentes topologías de red específicas, sin tener que modificar la subyacente. A parte de permitir separar funcionalidad, también nos permite separar usuarios o proveedores.

Esta separación ofrece múltiples beneficios, entre los que se encuentra una mayor flexibilidad en la ubicación de los elementos finales, porque la red ya no está restringida a una ubicación concreta.



Además, se pueden separar responsabilidades y obligaciones dentro de la red. Con la encapsulación se puede disponer de un solo administrador de toda la infraestructura (comunicada con el CCT, "la nube") encargado de los direccionamientos, la disponibilidad, el flujo de la carga, etc. y los operadores o proveedores encargados de sus políticas y servicios de direccionamiento, sin afectar a la infraestructura general. Esto es realmente importante dado la gran cantidad de servicios que puede incorporar la Red S3 y las características tan dispares que poseen. También ofrece gran flexibilidad de cara al futuro, para incorporar otras aplicaciones u otros proveedores de aplicaciones si así lo requiriera.

Para poder llevar a cabo esta encapsulación de paquetes, se añade a cada uno de los paquetes que se van a transmitir por la red, un nuevo encabezado destinado a los elementos inicial y final de la infraestructura, la cual no afecta a los dispositivos intermediarios. Es obligatorio que todos los elementos de la red comprendan como se configuran estas redes virtuales, la implementación de aplicaciones y la incorporación de nuevos usuarios.

5.3.2.2. Network Function Virtualization (NFV)

En el apartado anterior se ha descrito cómo se introduce la virtualización de la red en las capas de red y de datos. La técnica de Network Function Virtualization (NFV) permite virtualizar cada una de las funciones que se utilizan en un servicio de red.

La virtualización de las funciones de la red afecta a las capas superiores del modelo. En concreto, este enfoque de virtualización permite cambiar los elementos de hardware más costosos y dedicados, por equipos con software, donde se pueden ejecutar máquinas virtuales en servidores.

Simplificando, para poder añadir una nueva función a la red, es necesario incorporar una nueva máquina virtual que realice la función, y cuando ya no se requiera de ella, se desactiva o elimina. Por lo tanto, se reduce enormemente la dependencia de elementos de hardware dedicados (aquellos que se utilizan para una sola aplicación, y que una vez que se ha configurado, se espera que dure en el tiempo para poder recuperar la inversión, cosa que en el mundo actual en el que nos movemos no es viable) y se incrementa el nivel en la personalización en la red, aunque hay que tener en cuenta que se centra solo en las funciones de red y no en toda la red.

El poder desacoplar el software del hardware permite ampliar el ciclo de vida de los elementos y separar dichos ciclos de vida unos de otros, son independientes. Para aclararlo, esto se refiere a que, por una parte, se puede incrementar el ciclo de vida de los elementos físicos que compone la red, ya que el software es fácilmente renovable, y por otro, al tenerlo implementado por software y por funciones, se puede actualizar el software de solo uno ellos, manteniendo al resto igual, por lo que los ciclos de vida de las funciones quedan de manera independiente.

La estandarización de las NFV las divide en tres componentes principales:

- La infraestructura de virtualización de funciones de red (NFVI): Permite conseguir una abstracción de todos los recursos físicos de hardware de los que dispone la red, y los transforma en elementos virtuales independientes, distribuidos y



colocados de manera lógica. Gracias a la tecnología de virtualización se pueden emular los recursos físicos subyacentes como almacenamiento, cálculo y red.

- Orquestación y Administración (MANO): Es el encargado de gestionar la planificación y la duración de los recursos de software virtualizados de NFVI y los VNF y de cualquier tarea de gestión específica de la virtualización referente a la NFV.
- Funciones de red virtual (VNF): Hace referencia a la versión de virtualización de una función de red (tradicional), como puede ser un enrutador, conmutador o firewall. La virtualización de estos elementos no afecta a su comportamiento funcional. Para poderse implementar una VNF, se realiza a través de una máquina virtual o varias, si es necesario (esto aporta redundancia, tolerancia a fallos, escalabilidad, equilibrio de la carga, etc. por lo que es muy interesante para funciones críticas), incluso varias VNF pueden compartir una sola máquina virtual.

Las principales ventajas con el menor gasto en el consumo de red, un menor coste de mantenimiento y la sencillez y rapidez en la actualización.

Las capas de red a las que afecta esta virtualización son la capa de aplicación, la capa de presentación, la capa de sesión y la capa de transporte.

Las tecnologías de redes SDN y NFV son independientes, pudiendo implementarse de manera individual, pero también son complementarias, permitiendo obtener el beneficio mutuo de sus características y conseguir mejores resultados.

SDN funciona en las capas de red y de enlace de datos, permitiendo la virtualización de los recursos de consumo de red, gracias a la centralización de la arquitectura, mientras que NFV trabaja en las capas superiores, permitiendo así virtualizar los recursos de almacenamiento y cómputo. La finalidad es desacoplar el consumo/creación/uso de las aplicaciones o servicios que utilizan la infraestructura de la red, de la topología física subyacente, para poder mejorar en muchos aspectos la operatividad de la red y los procesos de la misma.

5.3.3. Red de comunicaciones de ingenios

La misión principal de la red de comunicaciones de ingenios es el control de los ingenios que se están desplazando por los diferentes entornos de navegación. Está formada tanto por el equipamiento y tecnología que utilizan los ingenios para comunicarse, como por el software de los mensajes que se intercambian los ingenios entre sí o entre ingenios y otros elementos.

Se deduce la necesidad de establecer un Estatuto de Comunicaciones que regule y estandarice el conjunto de reglas y protocolos de comunicaciones entre ingenios, de tal manera que cualquier elemento del sistema de transporte automatizado se rija por este estatuto común y se consiga la conectividad necesaria.

La red de comunicaciones de ingenios no crea mensajes, sino las reglas por las que se rigen estos mensajes y se encarga de enviarlos entre los diferentes elementos que forman parte de la propia red.



Existen dos objetivos principales de la red de comunicaciones de ingenios:

1. Comunicar a los ingenios con otros ingenios. Se denominan comunicaciones I2I (Ingenio a Ingenio).
2. Comunicar a los ingenios con la infraestructura y el Centro de Control de Tráfico. Se denominan comunicaciones I2X (Ingenio a Todo).

A continuación, se describe cada uno de estos tipos de comunicaciones.

5.3.3.1. Comunicaciones entre ingenios (I2I)

Las comunicaciones Ingenio a Ingenio (I2I) consisten en el intercambio de información entre dos o más ingenios que estén navegando de manera autónoma, dentro del sistema automatizado de transporte.

En la actualidad se hace referencia a este tipo de comunicaciones como V2V (*Vehicle to Vehicle*), según los estándares europeos o estadounidenses. Las comunicaciones I2I son el siguiente paso, haciendo referencia a las comunicaciones necesarias para la automatización del tráfico. Establecer el marco de referencia para las comunicaciones de los ingenios implica incluir la estandarización para vehículos aéreos, terrestres y marinos.

De acuerdo a lo analizado en el apartado 3.3, el despliegue de un sistema de transporte automatizado requiere de un proceso de transición. Durante este periodo lo lógico será incorporar los estándares de comunicaciones existentes para incrementar la capacidad de comunicación de los nuevos ingenios, y facilitar la convivencia con el tráfico convencional. Pero las comunicaciones I2I están diseñadas para el escenario en el que la totalidad de ingenios que navegan en una determinada región son autónomos.

Un elemento fundamental en las comunicaciones entre ingenios es el subsistema de comunicaciones del sistema autónomo (apartado 5.2.1.4). Tomando como base la información recolectada por los sensores del ingenio, el procesamiento realizado por el subsistema de percepción y las decisiones que toma el subsistema de planificación, la placa de comunicaciones transmite los mensajes correspondientes a la Red S3.

Analizando el funcionamiento del sistema de transporte automatizado, descrito hasta aquí, se observa una distribución en la toma de decisiones relativas a la navegación autónoma. Las decisiones a largo plazo corresponden al Centro de Control de Tráfico. Las tareas de planificación del tráfico, que se resumen en el cálculo, optimización y asignación de rutas corresponden al conjunto de ingenios. Las decisiones a corto plazo corresponden al ingenio, a su sistema autónomo, responsable de la ejecución de la tarea de la navegación, basándose en las circunstancias de cada momento, con el objetivo de cumplir la ruta que se le ha asignado. Esta distribución en la toma de decisiones no implica, en ningún caso, una reducción en la inteligencia embarcada en los ingenios. Cuanto más inteligentes sean los ingenios, mejor. Esto supone un mejor desempeño en sus funciones, un incremento en la seguridad y una mejor preparación para operar en un gran abanico de situaciones.

En el marco de un sistema de estas características, donde la toma de decisiones está distribuida, las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema son una cuestión crucial. La velocidad en las comunicaciones es importantísima, y un pequeño retraso en la llegada o emisión de un mensaje podría suponer un compromiso en el comportamiento ante



una determinada situación, por ejemplo, la irrupción de un obstáculo en la vía y la necesidad inminente de realizar una maniobra para esquivarlo o detener al ingenio. Por este motivo, este tipo de decisiones, denominadas decisiones a corto plazo, corresponden al ingenio, por motivos de seguridad.

Establecer un sistema de comunicación directa entre ingenios, planteado como sistema redundante a la gestión automatizada del tráfico, resulta estratégico, y permite incrementar sobremedida la seguridad de la movilidad automatizada.

5.3.3.1.1. Objetivos de la comunicación entre ingenios

Las comunicaciones entre ingenios permitirán la comunicación de todo este conjunto de decisiones a corto plazo al resto de ingenios, además del al CCT. Las situaciones en las que estas comunicaciones entre ingenios son más importantes, y requieren de la realización de acciones de comunicación puntual coordinadas entre ellos, son las siguientes:

1. Presencia de un obstáculo fijo en la vía. A través del subsistema de percepción, el ingenio es capaz de detectar e identificar los elementos y objetos presentes en el entorno de navegación. En caso de que se detectase un obstáculo fijo en la vía, que impidiese la navegación normal y, por tanto, obligase a realizar algún tipo de maniobra para evitarlo o detenerse, el ingenio notificará al resto de ingenios esta circunstancia, para que puedan adelantar sus respectivas planificaciones de ruta. Es un tipo de mensaje que también se enviará al CCT.
2. Aparición repentina de un obstáculo móvil en la vía. Este supuesto recoge aquellas ocasiones en las que de repente aparece un obstáculo dinámico en la vía, como puede ser un pájaro que cruza volando o un niño que cruza la calle corriendo. La transmisión de este mensaje tiene una doble finalidad, por un lado, informar a los ingenios cercanos de esta circunstancia, en la que dicho obstáculo móvil podría interferir con su trayectoria y, por otro lado, avisar de las posibles maniobras que tomase el ingenio para evitar el obstáculo.
3. Presencia de un obstáculo móvil en la vía de manera continuada. Circunstancia en la que un obstáculo dinámico se encuentra en la vía de manera prolongada, como puede ser un animal que entra corriendo en una carretera y se mantiene en ella durante un tiempo. Es un caso de especial atención, por el imprevisible comportamiento de dicho obstáculo dinámico, y el carácter prolongado en el que afectará al conjunto de ingenios que naveguen por esa vía.
4. Cambio de velocidad del ingenio. En la tarea cooperativa del tráfico autónomo, la circunstancia en la que un ingenio modifica su velocidad juega un papel relevante para los ingenios de su alrededor. Se comunica esta acción para contribuir y facilitar los cálculos y previsiones del resto de ingenios que se pudiesen ver afectados.
5. Cruces e intersecciones. Los cruces e intersecciones de viales son una de las situaciones más complejas de la navegación autónoma, y donde la gestión del tráfico tiene que proporcionar una solución muy acertada, para no comprometer la seguridad de los ingenios y de su pasaje. En esta circunstancia se establece un sistema redundante de comunicación entre ingenios, para garantizar el correcto desempeño de sus respectivas rutas.



6. Incorporación o salida de la vía. Las incorporaciones a los viales, o los cambios de carril son eventos cuya notificación, a pesar de que esté prevista con antelación, es fundamental realizar. Es una forma de consolidar el tráfico proactivo.
7. Incidencias o emergencias.
8. Estacionamientos. El estacionamiento, por lo general, implica el fin de una determinada ruta. Es un caso en el que el mensaje que se envía al conjunto de ingenios cercanos tiene el objetivo de comunicar una detención del ingenio en cuestión.
9. Paradas. En el transcurso de una determinada ruta un ingenio puede realizar una parada, bien sea programada o bien sea no programada. En el primer caso se tiene conocimiento previo sobre la parada, cuándo, dónde y porqué se producirá. En el segundo caso no se tiene este conocimiento previo. En ambas situaciones es un evento que se debe comunicar a los ingenios cercanos.

5.3.3.1.2. Información compartida por los ingenios

Cada ingenio que navegue de manera autónoma en una determinada región tendrá un rango de comunicación, determinado por la tecnología que utilice en cada caso. La navegación autónoma dentro del sistema de transporte automatizado se caracteriza por la necesidad de que los ingenios se comuniquen con aquellos que tienen a su alrededor en el entorno de navegación. Es un tipo de comunicación que principalmente se realiza con aquellos ingenios dentro del rango de comunicaciones, aunque si fuese necesario conectar con alguno fuera de este rango, se utilizará la propia Red S3.

La información más relevante del entorno de navegación es la que comparten los ingenios entre sí de manera continuada, siendo el contenido más relevante:

1. Evento de peligro. Es una situación en la que el ingenio representa o puede representar un peligro potencial para los ingenios que le rodean. Es un evento para poder anticipar las circunstancias anómalas y extraordinarias, derivadas de una avería o fallo mecánico del ingenio y pueda suponer un peligro para otros ingenios. El mensaje incluye la posición, la trayectoria, la dirección, la velocidad, la aceleración y el estado de actuadores afectados, entre otros parámetros que pudieran ser relevantes. Esta información enviada se emplea para identificar de manera inequívoca cuál es el ingenio en un evento de peligro, al igual que su trayectoria y las posibles interferencias con el resto, de forma que se puedan tomar las decisiones adecuadas, para prevenir y evitar cualquier tipo de incidente o accidentes.
2. Evento de emergencia. Notificación de que el ingenio ha realizado una acción de emergencia, que podría afectar a la seguridad de los ingenios circundantes. Podría incluir acciones como una maniobra de frenado repentino, una maniobra de esquivas de objetos u otras acciones que justificasen este evento de emergencia. La información que se transmite incluye la posición, la trayectoria, la dirección, la velocidad, la aceleración y el estado de actuadores afectados, entre otros parámetros. En este caso el estado del ingenio no representa un peligro para el resto del tráfico, pero sus acciones sí. Se informa de sus acciones para que los ingenios cercanos, además de la propia información que reciban de sus sensores,



- obtingan de manera redundante esta información y puedan adelantar la toma de decisiones, para evitar incidentes o accidentes.
3. Notificación de emergencia del pasaje. Situación en la que un usuario tiene algún tipo de emergencia, y bien el propio usuario o el ingenio realizan la solicitud de ayuda. Las circunstancias que pueden originar este evento son muy diversas, desde un accidente del ingenio hasta una enfermedad de un usuario. Es un evento aplicable de igual modo a los ingenios de transporte de mercancías. El mensaje emitido incluirá toda la información relevante, tanto del estado del ingenio como de las circunstancias de la emergencia. En definitiva, es una situación de emergencia relativa a la carga de pago del ingenio.
 4. Reconocimiento de emergencia. Es un evento que permite a un ingenio confirmar la solicitud de asistencia, ante una emergencia, y brindar detalles adicionales sobre las acciones ejecutadas y los requisitos de verificación. Es decir, es un mensaje a través del cual un ingenio se puede comunicar con otro para otorgarle asistencia. El ingenio que asiste, podría ser un ingenio de asistencia específico y dedicado a tal fin, o no, siendo un ingenio que por circunstancias pudiese ofrecer la ayuda necesitada.
 5. Relé de notificación de emergencia. En situaciones de emergencia, la redundancia en el sistema es fundamental para garantizar una respuesta, incluso ante la eventualidad de que se produjeran averías o fallos. En este caso, un ingenio actuará como transmisor de una notificación de emergencia, recibida por parte de otro ingenio, dentro de su alcance. Es posible que se necesiten múltiples relés de notificaciones en áreas remotas, o con poca densidad de tráfico, o ante situaciones de irregularidad en las comunicaciones.
 6. Perfil del ingenio. Es un mensaje estándar que incluye la información básica de un ingenio, como pueden ser sus características físicas, marca, modelo, fabricante, misión, estado, carga de pago, etc. Es una información de interés para numerosas aplicaciones, como puede ser el acceso a determinadas vías, segmentos o regiones, e incluso la participación en misiones cooperativas.
 7. Ubicación y movimiento del ingenio. Procedimiento rutinario de comunicación en el que se transmite la posición del ingenio, la velocidad, la aceleración, la dirección y la trayectoria que está siguiendo en todo momento. Son datos relevantes en el objetivo cooperativo del tráfico transparente, que aporta un nivel superior de seguridad. Además, es una información de especial interés en misiones en las que los ingenios realicen tareas coordinadas.
 8. Predicción de trayectoria de ingenio. En este caso, el ingenio transmite la información relativa a las trayectorias futuras que tiene previsto seguir para ejecutar su respectiva ruta. Es un flujo de datos que aporta las posiciones futuras del ingenio y que el resto de ingenios puede interpretar, para predecir el comportamiento de los elementos de su entorno. Este extra de transparencia es fundamental para simplificar el entorno complejo por el que se realiza la navegación autónoma. Juega un papel importante en las situaciones de emergencia, cuando un ingenio toma una decisión no prevista por el sistema, de manera que estos mensajes ayudan de manera proactiva al conjunto del tráfico.
 9. Coordinación de un clúster, enjambre o pelotón. En misiones en las que diversos ingenios cooperan de manera conjunta para la realización de un objetivo común, la comunicación constante entre ellos es imprescindible. En este tipo de operaciones es frecuente la existencia de un líder. El flujo de información incluye la identificación



del ingenio y su rol, la posición, la trayectoria seguida, los parámetros de rendimiento operativo y el perfil de rendimiento operativo conjunto e individual, entre otros.

10. Información del traspaso de una intersección. Las intersecciones en los viales son una de las situaciones más comprometidas de la navegación autónoma. El cálculo y optimización de rutas que se realiza en el sistema resuelve estas situaciones, sin embargo, por razones de seguridad se duplica esta información, mediante la transmisión directa entre ingenios, incluyendo la cooperación si fuese necesaria. Estos mensajes incluyen parámetros como la posición, la trayectoria, la dirección, la velocidad, la aceleración y el estado de actuadores, entre otros.
11. Datos ambientales. Las condiciones meteorológicas y ambientales del entorno de navegación tienen un papel fundamental en cualquier tipo de navegación. Los sensores de los distintos ingenios permiten captar información de una serie de parámetros de este entorno, y procesarlos para obtener un conocimiento de su estado. De esta forma, se puede compartir esta información ambiental con el resto de ingenios, para poder adelantar diferentes situaciones que pudieran afectar a su respectiva navegación. Los mensajes contienen condiciones ambientales como temperatura del aire, densidad del aire, estado de luminosidad, lluvia, niebla, nieve, viento, estado del pavimento, temperatura del asfalto, etc. Este conjunto de datos permite realizar estimaciones y previsiones a los ingenios del entorno para valorar la influencia que podrían tener en el desarrollo de su ruta.

5.3.3.2. Comunicaciones de ingenio a todo (I2X)

Las comunicaciones I2X (Ingenio a Todo) permiten a los ingenios que están navegando de manera autónoma, dentro del sistema de transporte automatizado, comunicarse con la infraestructura, es decir, la Red S3, y a través de esta red con el Centro de Control de Tráfico.

Actualmente se hace referencia a las comunicaciones de este estilo como V2I (*Vehicle to Infrastructure*) o V2X (*Vehicle to Everything*). Las comunicaciones I2X suponen un concepto más amplio con un mayor número de requisitos e implicaciones.

Este tipo de comunicaciones tienen la misión de posibilitar el conjunto de conexiones necesarias entre cualquier ingenio y los CCT, para el correcto funcionamiento del sistema de transporte automatizado. Algunas de las funciones más relevantes son:

1. Envío de las rutas a los ingenios. Antes de que comience cualquier ruta, el CCT realiza el cálculo óptimo de estas rutas, tal y como se explicó anteriormente, y es necesario conectar el módulo de comunicaciones del área de servicios del CCT con el subsistema de comunicaciones del ingenio mediante la Red S3. De esta forma el ingenio recibe la ruta asignada, incluyendo el conjunto de viales por los que transcurre, las características de los mismos, las reglas de tráfico aplicables, los parámetros de desempeño ideales, entre otra información relevante en función del tipo de misión.
2. Envío del entorno de navegación. En paralelo al caso anterior, el CCT trasladará el entorno de navegación por el que se desarrollará la ruta que necesita el ingenio para llegar a su destino, así como aquellos entornos requeridos por las posibles



- rutas alternativas. En algunas circunstancias este proceso consistirá en una simple actualización de determinadas regiones de dicho entorno de navegación.
3. Seguimiento de rutas. Otra de las funciones principales del CCT es el seguimiento de los flujos de tráfico, fundamental para tener un conocimiento actualizado del estado, en tiempo real, de estos flujos que posibilite la optimización de cada ruta. Para ello es necesario establecer una conexión de manera permanente con cada ingenio en la que éste informe de las trayectorias que está siguiendo.
 4. Solicitud de ruta o modificación de ruta. De acuerdo a los procesos expuestos en el apartado 5.1.4.2, los ingenios pueden solicitar nuevas rutas, o modificaciones de las rutas que están realizando, por diversos motivos. Es necesario establecer estos canales de comunicación para el correcto funcionamiento del sistema.
 5. Seguimiento de ingenio. La ejecución de la misión de seguimiento de ingenios, de su estado, por parte del CCT, requiere una conexión continuada con cada ingenio. Se establece una comunicación que transmite datos sobre los parámetros de estado del ingenio, que dependerán notablemente del tipo de ingenio y la misión que realice.
 6. Tercero Autorizado. La aplicación de este nuevo título jurídico implica una conexión directa entre el CCT y el ingenio para ejecutar las órdenes de alto nivel correspondientes (apartado 5.1.2.3).
 7. Actualización del entorno de navegación. El CCT dispone de un mapa completo de los entornos de navegación, que abarcan la totalidad de los viales por los que está operativo el sistema de transporte automatizado. Una vez generado, este entorno de navegación se actualizará con la información que recojan los ingenios. Por lo tanto, es necesario establecer este canal de comunicación que permita tener, de manera sistemática, una actualización del conjunto de entornos de navegación.
 8. Obtención de información de la vía o del entorno. En determinadas circunstancias podría requerirse, desde una Sala de Control de Tráfico, que un determinado ingenio transmitiera información de un determinado vial o de un determinado entorno de navegación. Es el supuesto de una investigación judicial o policial, por ejemplo. Es necesario por tanto establecer este canal de comunicaciones.
 9. Información de situaciones anómalas. A lo largo de las rutas surgirán numerosas anomalías identificadas por los ingenios, como la aparición de obstáculos, condiciones meteorológicas adversas, incidentes, accidentes, etc., que será necesario transmitir al CCT para su conocimiento y actualización de estas situaciones. Es una información empleada tanto para la actualización de los flujos de tráfico, como para informar al resto de ingenios de las mismas, en una tarea proactiva de seguridad.

5.3.4. Red de posicionamiento

El posicionamiento es una cuestión crítica en la navegación autónoma. Sin un conocimiento preciso de la posición en la que se encuentra un ingenio, en todo momento, el sistema autónomo no podrá alcanzar la situación de conciencia y, por tanto, no le será posible ejecutar la navegación por sus propios medios.

La virtualización de los entornos de navegación es una herramienta fundamental para el sistema de posicionamiento local del ingenio.



En el sistema de transporte automatizado, el posicionamiento es imprescindible por partida doble. Por un lado, para garantizar la operatividad y seguridad de los ingenios, mientras ejecutan la navegación autónoma y, por otro lado, para la gestión automatizada del tráfico, que necesita de un segundo testimonio, que verifique que la posición que comunican los ingenios es real.

La Red S3 se caracteriza por ser una infraestructura terrestre formada por geobalizas, que se distribuyen a lo largo del territorio. La creación de una infraestructura de estas características permite redefinir la concepción generalizada del posicionamiento, y diseñar un sistema específico (POX), que permita a esta red la obtención de la posición de los ingenios de manera independiente a los mismos, permitiendo al mismo tiempo actuar como sistema de obtención de la posición de los ingenios en caso de fallo del sistema embarcado.

5.3.4.1. Sistemas de posicionamiento actuales

Los sistemas de posicionamiento preponderantes en la actualidad, basados en constelaciones de satélites (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS) como pueden ser GPS, Galileo, GLONASS o Beidou presentan dos inconvenientes muy graves a la hora de su utilización en la navegación de altas prestaciones. Es el caso de la navegación autónoma en cualquiera de sus contextos.

En primer lugar, la incertidumbre nominal de posicionamiento de estos sistemas es superior a los 10 metros en la práctica totalidad de escenarios, aumentando a medida que incrementamos la altura con respecto a la superficie terrestre y disparándose en entornos urbanos o *indoor*. Adicionalmente, estos sistemas presentan una inestabilidad intrínseca en los valores del error de posicionamiento, debida a la configuración física existente entre los satélites y los objetos a posicionar.

En segundo lugar, el cálculo de la posición en sistemas GNSS se efectúa en el vehículo que debe ser localizado. De este modo, es el propio objeto el que debe comunicarnos dónde se encuentra. Este hecho se opone frontalmente al requisito de maximización de la seguridad del sistema, ya que no existe manera de determinar la veracidad de la información proporcionada, mostrando la opacidad de los GNSS. Adicionalmente, la utilización de este tipo de sistemas provocaría la dependencia de entidades externas, con todos los inconvenientes que esto supondría para el sistema de transporte automatizado.

La primera conclusión es evidente, los sistemas GNSS no pueden ser empleados en aplicaciones con altos requerimientos de exactitud y seguridad. Ahora bien, ¿qué tipo de sistemas tienen el potencial de alcanzar estos requisitos? La respuesta es directa: los sistemas LPS (*Local Positioning Systems*), en especial aquellos de tipología inversa (donde el cálculo de la posición se efectúe fuera de los objetos a posicionar, actuando éstos de forma pasiva durante el proceso de localización).

Los sistemas LPS se fundamentan sobre la construcción de una infraestructura terrestre, de forma que la distancia entre los objetos a posicionar (ingenios) y los componentes encargados de efectuar las mediciones de los sistemas de posicionamiento (balizas) se reduce considerablemente con respecto a los sistemas GNSS.

Esta nueva concepción trae consigo una serie de importantes consecuencias. Una reducción de la distancia ingenio-balizas redundará positivamente en la exactitud del sistema,



tanto a nivel nominal como sobre todo en términos de robustez temporal. Es evidente que, al reducir el trayecto de las señales de posicionamiento, la probabilidad de ocurrencia de fenómenos disruptivos se ve notablemente reducida. Adicionalmente, los LPS cuentan con una mayor flexibilidad a la hora de establecer la ubicación de las balizas del sistema, pudiendo disminuir en gran medida la presencia de efectos *multipath* o desvanecimientos rápidos de la señal, entre otros.

En esta línea, los LPS manifiestan una gran modularidad y escalabilidad, con una capacidad notablemente superior de adaptación a las características físicas del entorno. Es necesario destacar que las principales fuentes de error en sistemas de posicionamiento son, por orden de importancia: los errores de medición, los errores inducidos por los algoritmos de localización y los errores derivados del tipo de tecnología utilizada. A expensas de la tecnología empleada, la ubicación del balizado incide directamente sobre todas las incertidumbres de cálculo del posicionamiento, de ahí la importancia de la flexibilidad de optimización en la distribución de balizado que proporcionan los LPS.

En términos de complejidad, existe una dualidad que es necesario interpretar correctamente entre los GNSS y LPS. En líneas generales, el coste total de los GNSS (complejidad de diseño, implementación, operación y mantenimiento) es superior que el de los LPS. No obstante, esta relación comienza a disminuir a medida que aumenta la región de servicio de posicionamiento proporcionada por los LPS.

En base a lo anterior, es evidente que el cumplimiento de los requisitos fijados está ligado íntimamente a la utilización de sistemas LPS. El siguiente aspecto a tratar son las arquitecturas de posicionamiento más prometedoras para el diseño del sistema.

5.3.4.2. Arquitecturas de posicionamiento

La localización de los vehículos se efectúa, en todas las arquitecturas de posicionamiento, en base principalmente a: la medición de tiempos, las frecuencias, las potencias y los ángulos, o la combinación de estos parámetros.

En estas metodologías, la medición de ángulos de recepción (AOA) de la señal necesita una instalación de alta complejidad, con restricciones a la hora de implementación en entornos con fenómenos obstructivos de la señal, dificultando su flexibilidad de operación (ejemplo: sensibilidad en la utilización VOR/ILS en aeronáutica). En contraposición la exactitud alcanzada por estas metodologías es elevada.

La utilización de potencias (RSS) como elemento base del posicionamiento es relativamente simple y económica, debido a la gran cantidad de tecnología existente en este campo. Sin embargo, la exactitud alcanzada se encuentra severamente condicionada, especialmente en entornos urbanos con presencia de elementos móviles que condicionen el trayecto de las señales. La imposibilidad de generar modelos de predicción de pérdidas de potencia, en la propagación de las señales, dificulta sobremanera la generación de sistemas LPS con buena exactitud en todo tipo de entornos.

En cuanto a la utilización de frecuencias, la dependencia intrínseca de la frecuencia de la señal provoca una inestabilidad en la exactitud proporcionada por el sistema. Las razones radican en que la señal de posicionamiento es muy sensible a la morfología y la velocidad de los obstáculos del entorno. Adicionalmente la implementación de esta metodología en



sistemas LPS presenta una elevada complejidad, asociada a la utilización del espectro radioeléctrico existente, especialmente a la hora del aseguramiento de los servicios de posicionamiento en grandes áreas.

El uso de las metodologías basadas en mediciones temporales se ha impuesto, gracias a las altas prestaciones proporcionadas, en términos de exactitud, con una complejidad del sistema razonablemente reducida, también gracias a su robustez y a su universalidad. Junto a estas propiedades, predomina la posibilidad de establecer una arquitectura de posicionamiento de amplio rango de funcionamiento (pueden servir como ejemplo los sistemas LORAN o GPS).

Dentro de los sistemas basados en mediciones temporales, existen dos grandes categorías en función del tipo de mediciones realizadas por las arquitecturas: Time of Arrival (TOA) and Time Difference of Arrival (TDOA).

Las arquitecturas de posicionamiento TOA están basadas en la medición de tiempos absolutos, desde que la señal parte del ingenio hasta que alcanza el balizado, construyendo en el espacio tridimensional esferas de posibles localizaciones, donde puede encontrarse el ingenio con respecto a cada baliza.

En relación a este aspecto, es posible concluir que son necesarias un mínimo de 3 balizas desde el punto de vista matemático para efectuar el cálculo de la posición tridimensional en una arquitectura TOA. No obstante, la no linealidad del sistema ocasiona que existan dos posibles soluciones matemáticamente factibles utilizando 3 balizas, por lo que, el posicionamiento unívoco de un objeto en 3D requiere de 4 balizas para una metodología TOA.

Las arquitecturas de posicionamiento TDOA se fundamentan en la toma de mediciones de diferencias de tiempos de llegada de la señal de posicionamiento proveniente del ingenio a diferentes pares de balizas, originando en el espacio tridimensional hiperboloides de posibles ubicaciones del ingenio respecto de dos balizas (hiperboloide es el lugar geométrico de los puntos cuya diferencia de distancia a dos fijados es constante en 3D). El problema del posicionamiento tridimensional con la arquitectura TDOA se analiza en la publicación "*3D Tdoa Problem Solution with Four Receiving Nodes*", de la Universidad de León [182].

De este modo, son necesarias un mínimo de 4 balizas para generar 3 ecuaciones de hiperboloides que, a su vez, permitan obtener las tres coordenadas del ingenio en el espacio tridimensional. No obstante, y al igual que en el caso de los TOA, la presencia de no linealidad conduce a la existencia de dos soluciones viables desde el punto de vista matemático del posicionamiento. La solución pasa por incrementar a 5 el número de balizas para establecer la posición del ingenio unívocamente.

Ahora bien, las arquitecturas TOA y las TDOA convencionales requieren del sincronismo entre la totalidad de los relojes empleados para establecer las diferencias temporales. Este hecho condiciona notablemente la exactitud alcanzada por el sistema, en relación al nivel de precisión del sincronismo entre los elementos de la arquitectura.

En el caso de sistemas GNSS, esta incertidumbre es normalmente despreciable debido a que el error absoluto de sincronismo (del orden de 10 ns en GNSS) es numerosos órdenes de magnitud menor que el tiempo de trayecto de la señal de posicionamiento entre los



satélites y los targets. No obstante, en sistemas LPS esta incertidumbre se sitúa entre las más conflictivas, debido a la menor distancia de trayecto entre ingenios y balizado. Esta realidad, junto con la complejidad ligada a la estabilidad temporal del proceso de sincronismo, descarta la aplicación de este tipo de arquitecturas temporales en LPS.

Entonces, ¿qué arquitectura de posicionamiento es posible utilizar? ¿existe un nuevo grupo de sistemas con capacidad para proporcionar servicios de alta exactitud sin necesidad de sincronismo entre los elementos del sistema?

Las arquitecturas TOA son síncronas por naturaleza, debido a que su funcionamiento está gobernado por la medición de tiempos absolutos de trayecto de la señal, siendo indispensable el conocimiento de los instantes de emisión y recepción en todos los elementos activos del sistema.

Por otro lado, las arquitecturas TDOA no requieren necesariamente de sincronismo entre los dispositivos de medición para establecer los inputs temporales del sistema. En primer lugar, el instante de emisión del ingenio no es necesario para el cálculo de la posición, eliminando la presencia de relojes para medición temporal en el mismo. En segundo lugar, es posible diseñar circuitos de medición que no requieran un sincronismo entre las balizas del sistema, encontrándose en este punto el avance clave propuesto por las arquitecturas asíncronas A-TDOA y D-TDOA.

Ambas arquitecturas se fundamentan en la utilización de un único reloj, situado en una baliza (balizas maestras o *Coordinate Sensors*, CS), actuando el resto como simples repetidoras de los pulsos de posicionamiento (balizas esclavas o *Worker Sensors*, WS). Es interesante destacar que estas nuevas metodologías son aplicables tanto en sistemas de posicionamiento directos como inversos.

Estas metodologías se han analizado en detalle en la publicación "*Accuracy analysis in sensor networks for asynchronous positioning methods*", de la Universidad de León, que tiene una relación estrecha con el desarrollo del sistema de posicionamiento presentado en esta tesis [183]. En base a esta publicación, la arquitectura con las mejores prestaciones, en términos de exactitud, es la A-TDOA. Sin embargo, la utilización del ingenio como encargado de la redirección de las señales de posicionamiento, y la necesidad de emisión simultánea inicial de pulsos de posicionamiento por las balizas esclavas, se convierten en serios impedimentos a la hora de garantizar la seguridad y escalabilidad de esta arquitectura.

En base a todo lo expuesto hasta el momento, ¿qué conclusiones es posible obtener? ¿Es necesario diseñar un nuevo sistema de posicionamiento o podemos aplicar alguna de las arquitecturas existentes?

Partiendo de los requerimientos de: estabilidad para la exactitud nominal (<1 m), maximización de la seguridad, necesidades de gran escalabilidad, flexibilidad de operación y coste del sistema, es evidente que necesitamos diseñar un nuevo sistema de posicionamiento, basado en una infraestructura LPS con una arquitectura de posicionamiento asíncrona inversa.



5.3.4.3. Funcionalidades y requisitos del sistema de posicionamiento

El objetivo del sistema de posicionamiento de la Red S3, dentro del sistema de transporte automatizado, es proporcionar la ubicación de todos los ingenios en todo momento y en tiempo real, para poder interactuar con ellos de forma efectiva, garantizando la seguridad en los desplazamientos y el incremento de la eficiencia de los mismos. Los principales criterios de diseño del sistema son:

- Sistema LPS. Diseño de un nuevo sistema de posicionamiento local (LPS) de tipología asíncrona e inversa.
- Ubicación 3D. El sistema debe proporcionar una ubicación tridimensional en tiempo real de todos los ingenios, bien sean terrestres, aéreos o marinos, que naveguen de manera autónoma dentro del sistema de transporte automatizado.
- Exactitud sub-métrica. Es imprescindible que el sistema proporcione una exactitud con un error por debajo de un metro en el posicionamiento de los ingenios, con garantía de estabilidad en el funcionamiento del sistema, independientemente de las condiciones de operación.
- Maximización de la seguridad. La seguridad es el criterio fundamental en el diseño de todo el sistema de transporte automatizado, por lo tanto, el sistema de posicionamiento debe maximizar la seguridad a nivel de la arquitectura, las comunicaciones del sistema y la continuidad de funcionamiento del algoritmo de posicionamiento.
- Minimización del coste. El diseño aplica el criterio de minimización del coste en base a la optimización del número de balizas, minimización del consumo energético, complejidad de implantación y funcionamiento del sistema, entre otros.
- Escalabilidad, flexibilidad y modularidad. El aseguramiento de estos factores es fundamental para el despliegue e implementación del sistema en la amplia variedad de entornos de navegación existentes. Se emplean algoritmos de distribución de balizado de aplicabilidad a cualquier tipo de entorno.

5.3.4.4. Arquitectura del sistema de posicionamiento POX

La arquitectura de este sistema de posicionamiento de la Red S3 del sistema de transporte automatizado se denomina POX. De acuerdo a los requisitos de diseño del sistema, se debe desarrollar una nueva arquitectura de posicionamiento basada en una tipología TDOA asíncrona e inversa.

El comportamiento inverso (o pasivo) del sistema permite el cálculo de la posición de los ingenios sin que estos intervengan en dicho cálculo. Es decir, el ingenio en cuestión emite una señal de posicionamiento que será procesada íntegramente por la arquitectura de posicionamiento. Este proceso permite la total transparencia durante el proceso de localización, posibilitando la creación de servicios de certificación de posición y de segundo testimonio.

La arquitectura POX se construye como un LPS, basada en una infraestructura terrestre y de uso compartido con la Red S3 y el resto de sus funcionalidades y servicios. Este hecho permite aprovechar la orografía del terreno para situar las balizas, de tal forma que se optimice el funcionamiento del sistema POX, entendiendo este hecho como el cumplimiento de tres propósitos fundamentales: maximización de exactitud del sistema, garantía de

seguridad y funcionamiento en todos los puntos del entorno de navegación, y ejecución en tiempo real.

Destacar que el término arquitectura POX hace referencia a todos los procedimientos que tienen lugar entre un ingenio y un conjunto/bloque de al menos 5 balizas (para establecer posicionamiento unívoco en 3D). El conjunto de balizas está formado por balizas maestras (BM) y balizas esclavas (BE).

5.3.4.4.1. Principio de funcionamiento del sistema POX

El funcionamiento de la arquitectura POX está fundamentado en la utilización de un único reloj de medición, presente en el balizado maestro, siendo necesaria la confección de un circuito de posicionamiento que permita la obtención de las diferencias temporales de los inputs del algoritmo de posicionamiento.

A continuación, se presenta el funcionamiento de la arquitectura POX, desde el punto de vista del trayecto de las señales de posicionamiento, efectuado para obtener las mediciones TDOA necesarias para el cálculo de la posición del ingenio.

El proceso comienza con la emisión omnidireccional de la señal de posicionamiento por parte del ingenio (Figura 5. 15). Esta señal está caracterizada por el identificador del vehículo y el número de pulso de posicionamiento. Estos dos parámetros garantizan la obtención de mediciones temporales por parte de la arquitectura del mismo vehículo, y referidas al mismo instante temporal, en relación a la emisión de la señal de posicionamiento por parte del vehículo.

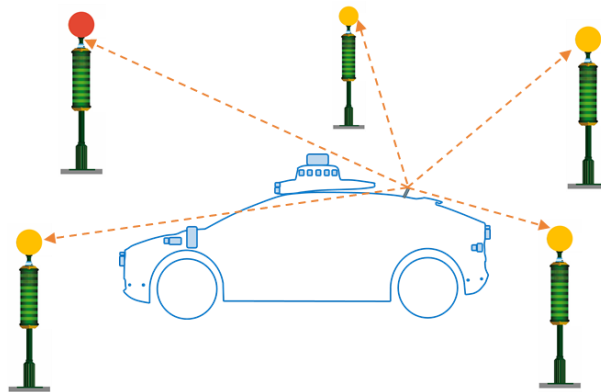


Figura 5. 15. Emisión omnidireccional de posicionamiento en la arquitectura POX.

La señal de posicionamiento proveniente del ingenio alcanzará cada una de las balizas esclavas en cobertura, existiendo al menos 4 para asegurar el cálculo de la localización del ingenio en condiciones normales de operación.

Estos componentes del sistema reenviarán de forma direccional a la baliza maestra el contenido de la señal de posicionamiento, introduciendo el identificador de la BE correspondiente. Tanto este parámetro, como su ubicación espacial, serán conocidos de antemano por el software encargado del cálculo de la posición. Este proceso se esquematiza en la Figura 5. 16, donde se representan en amarillo las BE y en rojo la BM.

El reenvío de la señal de posicionamiento se efectuará hacia la baliza maestra asociada a ese conjunto/bloque de balizas mediante la técnica “receive and retransmit”. En este

proceso se recibe la señal y se realiza una amplificación de su potencia para maximizar la calidad en la retransmisión baliza esclava – baliza maestra. Esto resulta de vital importancia, ya que las incertidumbres existentes en las mediciones temporales por causa de ruido o interferencias son directamente proporcionales al nivel de *Signal-to-Noise Ratio* o *Signal-to-Interference Ratio* existente.

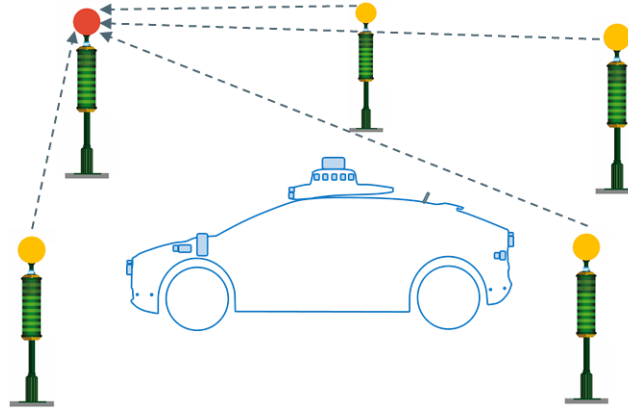


Figura 5. 16. Reenvío de la señal de posicionamiento de las BEs hacia la BM.

La BM es el elemento encargado de efectuar las mediciones temporales propias de la metodología TDOA. Para ello se realiza la diferencia temporal entre los instantes de llegada de la señal procedente del ingenio –que ocurrirá en primer lugar- con respecto a cada uno de los instantes de recepción de la señal del ingenio reenviada por el BE. Este proceso se muestra en la Figura 5. 17.

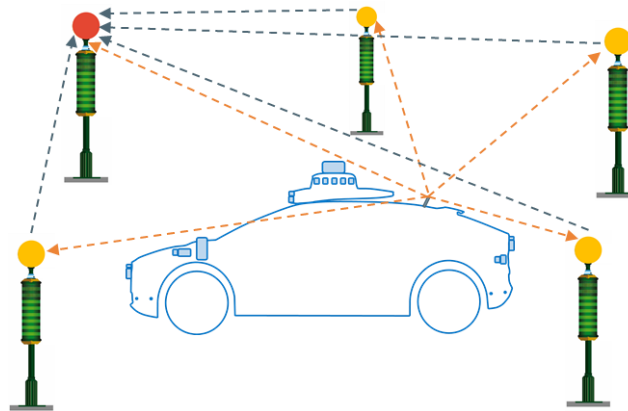


Figura 5. 17. Proceso de recepción de señales de posicionamiento procedentes del ingenio y las BEs por parte de la BM.

Mediante esta metodología es posible obtener mediciones temporales independientes entre sí, a diferencia de las arquitecturas TDOA convencionales, donde estas medidas se encuentran correlacionadas entre sí. Este hecho resulta de vital importancia a la hora de establecer las mínimas incertidumbres de error de posicionamiento, en función de la arquitectura del sistema y en un entorno con presencia de ruido.

El BM almacenará el instante de recepción de la señal procedente del ingenio, que será diferenciado de los pulsos reenviados por las BEs, en base a la información adicional presente en estos últimos –con el identificador asociado a cada BE-.



El cálculo de la posición se efectuará, siempre y cuando se completen el mínimo de mediciones temporales necesarias para el posicionamiento 3D, para el mismo ingenio y el mismo número de pulsos del mismo. Adicionalmente, las señales de posicionamiento solamente podrán utilizar un máximo de una BE (un salto) en su trayecto.

En el resto de situaciones, donde no se completen las mediciones temporales, o se encuentren fuera del marco temporal máximo asignado a cada grupo de BM/BEs en base al conocimiento previo de la ubicación del balizado, será desestimado.

Por último, la solicitud de posicionamiento al ingenio se realizará en base a una comunicación desde el balizado, o mediante un controlador instalado en el ingenio que envíe pulsos con independencia del mismo.

5.3.4.4.2. Desarrollo del sistema de posicionamiento POX

Diseñar un sistema de posicionamiento nuevo representa un enorme reto científico, pero al mismo tiempo, al tratarse de un sector como el transporte autónomo, es una cuestión estratégica.

La elaboración de esta tesis doctoral se ideó con el objetivo de realizar el diseño conceptual de un sistema de transporte automatizado, que sirviese como punto de partida para su implementación práctica, así como facilitar las muchas investigaciones necesarias para su perfeccionamiento. El desarrollo del sistema de posicionamiento es un claro ejemplo. Los trabajos derivados del diseño conceptual del sistema POX se han realizado en la empresa Drotium, en colaboración con la Universidad de León.

Los desarrollos se encuentran en un estado muy avanzado, sin embargo, debido a su carácter estratégico, los algoritmos y arquitecturas detalladas del sistema POX se encuentran bajo la propiedad intelectual de Drotium y, a fecha de publicación de esta tesis, aún no son de dominio público. No obstante, además de las citadas publicaciones científicas [182], [183], se han publicado dos tesis doctorales analizando cuestiones importantes de la problemática de un sistema de posicionamiento de estas características. Por un lado, la tesis “Análisis de Sistemas Temporales de Posicionamiento Local para Aplicaciones de Elevada Exactitud: Desambiguación en el Cálculo de la Posición, Distribuciones Optimizadas de Sensores y Comportamiento Mejorado en Condiciones de Fallo” [184], y por otro lado la tesis “Optimización mediante Algoritmos Genéticos y caracterización de incertidumbres de ruido, relojes y Non-Line-of-Sight en sistemas de posicionamiento basados en mediciones temporales” [185].

5.3.5. Infraestructura de la Red S3

La infraestructura de la Red S3 se define en base a sus dos funciones principales, las comunicaciones y el posicionamiento, y al resto de servicios adicionales que ofrece para la movilidad automatizada.

Las tecnologías empleadas para ejecutar estas funciones y dar estos servicios tiene un papel crucial en el diseño de esta infraestructura. La Red S3 estará formada por una infraestructura compuesta por gran cantidad de elementos muy variados, que estarán



integrados bajo una misma estructura de red. A esta gran variedad de elementos y sensores que la forman se le denominará con carácter genérico red de geobalizas.

Una de las características que definirá la Red S3 es la integración de diferentes tecnologías de comunicación, aplicables a diferentes entornos de navegación y una amplia variedad de servicios. Según lo analizado en el apartado 5.3.1.1, existe una amplia variedad de tecnologías de comunicación para los diferentes tipos de ingenios. Es necesario aún seguir trabajando en estos desarrollos tecnológicos, de manera previa a fijar o establecer criterios generalizados que determinen las tecnologías en cada caso. No es objetivo de esta tesis doctoral definir las tecnologías de comunicación o posicionamiento que se utilizarán en los diferentes entornos de navegación, pero sí definir la arquitectura y funcionalidades principales de la Red S3, que es el paso previo a esta implementación tecnológica. De la misma manera, la red de geobalizas estará formada por una importante diversidad de sensores, con sus tecnologías y especificaciones propias, que es necesario integrar en el marco de la red homogénea de comunicaciones.

5.3.5.1. Red de geobalizas

Uno de los pilares que forma la infraestructura de la Red S3 son las geobalizas. Una geobaliza es un dispositivo con capacidad de soportar los servicios para la automatización del tráfico. La mayor parte de estas geobalizas tendrán una posición fija sobre la superficie terrestre, aunque puede existir alguna que sea móvil.

Las geobalizas tendrán características muy diferentes dependiendo de su misión y objetivos dentro del sistema de transporte automatizado. Puede haber geobalizas de comunicaciones, de posicionamiento, de detección del estado de la vía, meteorológicas, etc.

Por otro lado, hay que destacar que las geobalizas no tienen por qué tener siempre la misma estructura física, pueden variar mucho en función de su funcionalidad y situación en la red, aunque existen unas características básicas:

- Integrarse en el medio presente: Sus estructuras serán acordes con el medio que les rodea. Serán elementos que tratarán de camuflarse en la arquitectura o que aportarán una función social.
- Proteger su funcionamiento: la estructura debe de ser capaz de soportar condiciones meteorológicas adversas, tratando de asegurar su correcto funcionamiento.
- Sistemas de alimentación: es importante que ofrezca estabilidad y fiabilidad en el sistema, de manera que no se desconecte de la red. Actualmente, una de las opciones que se baraja para su alimentación es el uso de energías renovable, como placas solares.

Cada una de estas geobalizas, se distribuye por el territorio, para dar cobertura a una extensión de terreno concreta y a todos los ingenios o elementos que estén en esa zona.

El despliegue de esta red de geobalizas se fundamenta en dos conceptos importantes: el IoT y la Computación en la Niebla.



5.3.5.1.1. IoT

En los últimos años a la mayoría de productos tecnológicos se les ha dotado de más inteligencia y conectividad. Un ejemplo de ello son los teléfonos móviles. Al principio solo servían para llamar, pero hoy en día embarcan inteligencia y una mayor conectividad. Esto supone ofrecer al usuario más servicios.

La movilidad no va a ser una excepción. La complejidad que se requiere para poder automatizar la movilidad es alta, por lo que será necesario el despliegue de muchos equipos y elementos distribuidos, y en grandes extensiones de terreno. Todos ellos han de tener conectividad y cierta inteligencia.

Actualmente, existe una tendencia que se basa en la interconexión y agrupación de dispositivos a través de una red (existen muchos tipos de redes), a través de la cual, todos los elementos que estén conectados a ella pueden interactuar. Se denomina Internet de las Cosas (IoT). Aplicaremos este concepto a la Red S3, creando redes de geobalizas que ofrezcan un valor añadido a través de servicios y aplicaciones. Es muy importante destacar que no se diseña la red de geobalizas con conexión a Internet, sino que se está aplicando el concepto IoT a la Red S3.

Hay que tener en cuenta que la principal misión del Internet de las Cosas es la de conectar los objetos con la red. Al igual que lo hacen los humanos para comunicarse y evolucionar, se trata de extrapolar esta idea a estos dispositivos.

El IoT se caracteriza por una mejora de la eficiencia, logrando reducir los costes y mejorando el servicio al cliente. Para ello se recogen datos en tiempo real del entorno, para un posterior análisis que permita tomar la mejor decisión. El Centro de Control de Tráfico contará con algoritmos capaces de gestionar toda esta información.

Pero también tiene unos retos considerables: la compatibilidad, la complejidad y la ciberseguridad.

- **Compatibilidad.** La compatibilidad es el mayor problema. Actualmente no existe un estándar para la monitorización y el etiquetado de los sensores, es decir, las organizaciones de normalización como la ISO o la UNE han publicado muy poco al respecto. Los proveedores utilizan protocolos de comunicaciones estándar, que tienen la misma filosofía que IoT.
- **Complejidad.** La complejidad es un problema genérico del IoT. En la actualidad los organismos o empresas que quieren beneficiarse del IoT requieren un enorme gasto en infraestructura: instalación de cableado, mantenimiento, seguridad, etc. Dentro del sistema de transporte automatizado, la infraestructura que se encarga de enviar los datos es compartida con otros servicios, por lo que, en este caso, solo habría que añadir elementos finales.
- **Ciberseguridad.** Es otro problema asociado al IoT, pero una vez más, el hecho de contar con una infraestructura dedicada y propia, que conocemos y que no está formada por una coalición de sistemas, aporta la fiabilidad y seguridad, que ninguna otra red puede ofrecer. La infraestructura (Red S3) se basa en la ciberseguridad, como su propio nombre indica, red de seguridad al cubo. Para ello encripta y autentifica los mensajes. De esta manera, la información está protegida de durante todo el envío. Por otro lado, se logra la protección de datos que tanto revuelo está causando en la sociedad actual. No se plantea la comercialización de datos a



terceras partes, evitando así problemas de privacidad, asociados a la recogida de datos sensibles.

Hay que tener en cuenta que en la inmensa mayoría de servicios de la Red S3 los mensajes que se envían tendrán un peso muy pequeño (del orden de bytes). necesitando un ancho de banda muy reducido. Esto es ideal para estándares como el IEEE 802.15 en redes inalámbricas. Estas comunicaciones deben estar definidas en una arquitectura, con el objetivo de esquematizar y simplificar el contexto de su funcionamiento, y de encajarlas dentro del sistema automatizado de transporte.

Enviar datos a los CCT es labor de los dispositivos finales. Esto quiere decir, que el CCT establece los criterios de temporalidad para el envío de los datos desde los dispositivos finales, y estos serán los encargados de llevarlo a cabo. El CCT puede modificar sus criterios si así lo requiriera. El motivo principal es la seguridad. La información que se envía no solo es la carga útil (valor de la medición), también existen otras como: el identificador de la geobaliza que lo envía, sello de tiempo en el que el dato ha sido generado, identificador de mensaje, etc. Esto es una característica de los mensajes en los protocolos de comunicación. El objetivo es estructurar los mensajes para facilitar las labores de gestión y análisis de los datos en el Centro de Control de Tráfico.

El Centro de Control de Tráfico utiliza estos datos para tomar decisiones, a medio y largo plazo, como puede ser la gestión de sus rutas, análisis del entorno, modelos predictivos, etc. Gracias a la red de geobalizas y, por ende, a la Red S3, se puede establecer una comunicación (concreta y acotada) con los ingenios, para determinadas acciones (con sensores y actuadores), dado la cercanía al borde.

Es interesante poder delegar ciertas funciones a la Red S3, con el fin de eliminar complejidad al Centro de Control de Tráfico. Es aquí cuando dotamos de inteligencia (limitada) a la red para no tener que esperar una respuesta del CCT. Al igual que sucede con los ingenios, ciertos servicios requerirán autogestión. Por ejemplo, en las estaciones de mantenimiento, los datos de los ingenios se descargarán en los equipos de autodiagnóstico de los talleres. Se analizarán los fallos y se notificará al CCT. Existen otros casos como los sistemas de iluminación de los viales. Se requerirá de un control local pero gestionado por CCT. Por ejemplo, existirán unos sensores para detectar a un ingenio cuando pase por una calle y unos actuadores que, cuando esto suceda, activen la luz (puede ser igual para personas). Además, el CCT tiene control sobre la iluminación, por lo que puede encenderla, si fuera necesario, o solicitar/recibir datos de cuándo se activan estos actuadores. Existen varios servicios que atienden a estas necesidades. A esto se le conoce como control distribuido. A esta inteligencia que está distribuida por la red, centralizada en un elemento que se sitúa al borde de la misma, se le conoce como computación en la niebla o *edge computing*.

En definitiva, se aplica el IoT como una filosofía de conectividad entre los elementos que conforman la Red S3. Esta infraestructura de geobalizas genera una gran cantidad de datos (Big Data) que han de ser soportados por la Red S3.

5.3.5.1.2. Computación en la Niebla

El *edge computing* o computación en la niebla es un nuevo paradigma de computación distribuida. En esta computación se realizan labores de pre-tratamiento de los datos



adquiridos. También es capaz de ejecutar algoritmos en tiempo real como redondeos, operaciones aritméticas básicas, etc. Hay que tener en cuenta que, en ocasiones, se requieren respuestas rápidas y para ello se necesita esta inteligencia o procesamiento en el borde. Por ejemplo, en el accionamiento de una barrera del telepeaje cuando los ingenios están en movimiento. Si se tuvieran que enviar los datos al Centro de Control de Tráfico el tiempo de envío y procesamiento es más largo (para simplemente levantar una barrera). De ahí la necesidad de usar la computación en la niebla.

La computación en la niebla se sitúa entre los dispositivos finales y el CCT. Al *edge computing*, como su propio nombre indica, se le dota de inteligencia, es decir, será capaz de analizar todas las señales de entrada y administrar las salidas. Puede ejecutar algoritmos de control y gestionar los diversos servicios. En todo momento el CCT podrá modificar los parámetros de este control o gestión. En otras palabras, las señales de los dispositivos IoT no se enviarán directamente al CCT, pasarán por un lugar “centralizado” donde se analizarán los datos. Un ejemplo, puede ser la gestión de un aparcamiento. Este está equipado con numerosos dispositivos de presencia de ingenios, entre otros. La computación en la niebla analiza las señales de todos e informa al CCT de los sitios disponibles. Además, toma decisiones de manera autónoma, como el cobro del aparcamiento, la apertura y cierre de las barreras, etc.

La ventaja de esta estrategia reside en dar respuestas en tiempo real, sin necesidad que los datos recorran largas distancias, con el ahorro tanto económico como de consumo de recursos de infraestructura que supone. La baja latencia permite ofrecer respuestas rápidas. La gran flexibilidad de la que dispone la infraestructura Red S3 permite soportar este tipo de servicios y otros con características totalmente distintas.

Otro ejemplo es el tratamiento de imágenes generadas por las cámaras instaladas en los entornos de navegación. Con el fin de minimizar el ancho de banda que se usa, se embarcará la mencionada inteligencia. De esta manera, solo se envían alertas, reduciendo la carga de procesamiento necesaria en el CCT.

El objetivo es lograr una mejora de la eficiencia en la movilidad, uno de los pilares fundamentales del sistema automatizado de tráfico. Gran parte de la información obtenida se emplea en la movilidad, aunque esta también puede tener valor para otras aplicaciones. En esta misma línea, aprovechando la red desplegada, se podrán ampliar los equipos instalados (escalabilidad), con el fin de recolectar otros datos de interés, tanto para empresas privadas como para las administraciones públicas.

5.3.5.2. Servicios de la Red S3

La misión principal de la Red S3 dentro del sistema de transporte automatizado es establecer las comunicaciones entre los diferentes elementos y proporcionar el posicionamiento de los ingenios. Adicionalmente a estos dos objetivos primarios, el despliegue de una infraestructura dedicada, y de altas prestaciones, permite ofrecer una serie de servicios a la movilidad autónoma, aprovechando dicha infraestructura.

Estos servicios son muy diversos, incluyendo aquellos que tienen un papel destacado en la movilidad y aquellos que se podrían considerar auxiliares. La escalabilidad de la Red S3 proporciona la capacidad de incrementar los servicios cuando sea necesario, siempre y



cuando no comprometan la seguridad e integridad del sistema de transporte automatizado. En este apartado se analizan los más relevantes.

5.3.5.2.1. Servicio de identificación de ingenios

El principio de diseño del sistema de transporte automatizado, y, por ende, de la Red S3 es la seguridad. La redundancia en las funcionalidades de cualquier sistema se aplica fundamental con el principio de garantizar la seguridad. Como se expuso anteriormente, una de las funciones de la Red S3 es proporcionar el Segundo Testimonio, respecto a la navegación de los ingenios. Consiste en proporcionar evidencias de un tercero, que verifique la información que le llega al CCT por parte del ingenio. Las cualidades más importantes del Segundo Testimonio son:

- Seguimiento de rutas y trayectorias de los ingenios. Mediante la tecnología de comunicaciones y posicionamiento se puede realizar un seguimiento de las rutas y trayectorias seguidas por los ingenios. Además, se puede contrastar con otros elementos de la propia red, como pueden ser cámaras o LiDAR.
- Proporcionar Sellos de Tiempo. El concepto de Sello de Tiempo hace referencia a la emisión de un certificado que diga que un ingenio estaba donde decía estar en un instante determinado. Es decir, el sello de tiempo certifica una posición de un ingenio en un instante de tiempo concreto. Tiene importantes connotaciones judiciales.
- Detectar anomalías o intrusos. El seguimiento continuado del conjunto del tráfico autónomo permite a la red identificar posibles anomalías o comportamientos extraños, ante los cuales se generará una alerta. De la misma forma es posible identificar posibles intrusos con fines desconocidos que podrían comprometer la seguridad e integridad del resto de ingenios.

La tecnología de comunicaciones y la de posicionamiento tienen un papel destacado en este servicio, pero también son importantes sensores adicionales. Uno de estos elementos son las cámaras de visión, en combinación con software que permita tanto la visión artificial enfocada a la detección de objetos como la visión artificial enfocada a la detección de ingenios.

La gestión automatizada del tráfico no necesita de los datos obtenidos por las cámaras, pero sí que son de utilidad como soporte, para determinadas aplicaciones y para las personas que se encuentren en las Salas de Control de Tráfico.

La información recolectada se envía al CCT, por lo tanto, requiere de su transmisión por la Red S3. El ancho de banda requerido depende en gran medida del tipo de sensor que se trate. Una cámara necesita un ancho de banda muy grande en comparación con otros sensores, como por ejemplo una galga extensiométrica. Este proceso de envío de datos requiere de un procesamiento de la señal de los dispositivos para transmitir datos definidos al CCT, es decir, la computación en la niebla. En la inmensa mayoría de ocasiones, si una cámara detecta un ingenio, se le envía al CCT un mensaje con las características relevantes del ingenio, que permitan su identificación y los parámetros relevantes de su ruta, como carril por el que circula y su velocidad, en vez de enviar un video completo del ingenio navegando. De esta forma, cuando se ha procesado la señal captada por el sensor, se



puede enviar un mensaje que requiere un ancho de banda pequeño, pero con una frecuencia elevada.

Sin embargo, si en determinadas circunstancias, desde el CCT, y más concretamente desde una Sala de Control de Tráfico, se solicitase visionar una cámara directamente, se debe poder establecer esta conexión, situación en la que las necesidades de ancho de banda y latencia son mayores. La Red S3 ha de ser flexible.

Adicionalmente a las cámaras, existen otros sensores que miden magnitudes que permiten realizar la identificación del tráfico, bien de manera independiente o bien como complemento a las cámaras. Los más relevantes son: LiDAR, radar, ultrasonidos, infrarrojos, espiras magnéticas y galgas extensiométricas.

Las características de los diferentes entornos de navegación determinarán los parámetros de tráfico a controlar en cada uno de ellos, y por tanto la configuración de dispositivos de la Red S3. La infraestructura de red prioriza los mensajes de los diferentes servicios para garantizar que los más críticos tengan menor latencia. En este servicio de identificación de ingenios, la latencia no es tan crítica, pero es un proceso que debe realizarse en tiempo real.

Un caso práctico de aplicación de este servicio es el control de un cruce, considerado un lugar crítico en la gestión del tráfico. Una configuración tipo para este servicio consistiría en la combinación de un LiDAR, encargado de medir las velocidades de los ingenios que están circulando, y una cámara, que proporciona una identificación visual de los ingenios. La unión de ambos sensores permitirá al CCT la obtención de datos muy relevantes, para verificar con un segundo testimonio los desplazamientos de los ingenios en un cruce, de manera independiente a la red de comunicaciones entre ingenios.

5.3.5.2.2. Servicio de meteorología

Conocer las condiciones climáticas es un factor clave en la movilidad autónoma, en especial en la navegación aérea y la navegación marina, afectando también a la navegación terrestre. Determinadas condiciones meteorológicas podrían dificultar, restringir o incluso imposibilitar que se realice la navegación autónoma en condiciones de seguridad. El viento es crítico en las operaciones de aeronaves, y si la velocidad del viento supera los límites del diseño de una aeronave en concreto, este ingenio no podría realizar su misión. El oleaje es un factor fundamental en la navegación marina. En la navegación terrestre, las lluvias intensas pueden restringir la velocidad de circulación, al reducir la adherencia, la estabilidad en las curvas, incrementar la distancia de frenado, dificultar la visibilidad, etc. Son algunos ejemplos concretos de condiciones climáticas de especial relevancia en la movilidad.

Las inclemencias meteorológicas afectan a la navegabilidad de los ingenios, a la propia Red S3 y al CCT, al condicionar las rutas de determinados ingenios, lo que afectará a los flujos de tráfico, necesitando de recálculos no previstos.

Actualmente existen redes de estaciones meteorológicas distribuidas por el territorio nacional, gestionadas por organismos estatales como la AEMET o Puertos de España, y organismos privados. Estas organizaciones publican de forma continuada datos sobre las estaciones que disponen. Los datos que proporcionan son representativos en su radio de acción. Es decir, que existen zonas en las que no se podría conocer con exactitud las



condiciones meteorológicas. Un ejemplo, claro es cuando en una zona de una ciudad está lloviendo mientras en la otra hace sol.

El despliegue de la red de geobalizas incrementará notablemente las capacidades de medición de las condiciones meteorológicas, prestando especial atención a aquellas zonas donde sean frecuentes las condiciones más adversas para la navegación. De esta forma, el CCT podrá combinar la información y los datos obtenidos, tanto por la propia red de sensores, como aquellos proporcionados por los organismos existentes, y lograr así unos modelos predictivos y mediciones más precisas.

En lo referente a las comunicaciones de los sensores meteorológicos, el ancho de banda que se requiere es mínimo. El peso de los mensajes es muy reducido. Además, en condiciones normales estos no se enviarán de forma continuada, se enviarán cada cierto tiempo, pues las variaciones son muy lentas. La latencia no interfiere en la utilidad del dato.

Algunos de los equipos que incorpora este servicio no tendrán que contar con alimentación de la red eléctrica, por lo que incorporarán baterías. Se podrán instalar placas solares, generadores eólicos o sistemas de alimentación de energía renovables alternativos. Si por algo se caracterizan los dispositivos finales es por su bajo consumo eléctrico. En la mayoría de casos, mientras los equipos no estén midiendo ni enviando datos, estos podrán apagarse o entrar en modo reposo. Esto supone un ahorro considerable de energía.

Entre los sensores de medición más relevantes se encuentran: termómetro, higrómetro, barómetro, pluviómetro, luminancímetro y anemómetro. La ventaja de poderlos conectar a “cualquier” geobaliza hace que se puedan desplegar en función de su radio de acción o distancia a la que sean capaces de medir. A estos se les puede añadir más si las circunstancias lo requieren, lo que otorga una gran escalabilidad. Algunos de los datos que le pueden llegar al CCT son: temperatura, presión atmosférica, humedad, luminosidad, velocidad del viento o precipitaciones.

Esta información meteorológica no tiene un carácter prioritario en la mayoría de los casos, más bien tiene un carácter informativo. Esta información es enviada cada cierto tiempo, el que el CCT necesite para poder satisfacer sus requisitos (estos tiempos pueden variar en función de la estación del año en la que nos encontremos o el momento del día). No obstante, en circunstancias en las que se produzcan cambios bruscos o repentinos de las condiciones meteorológicas, especialmente adversos para la navegación, estos datos cobrarán mayor importancia, y se deberá aumentar la frecuencia de envío.

Aunque en la red de sensores se priorizan aquellos que permiten facilitar el desplazamiento de los ingenios, las aplicaciones de estos datos meteorológicos recogidos pueden ir más allá del objetivo de la movilidad y ser de mucha utilidad para la Red S3. Estos datos tienen valor para predicciones sobre la generación de energías dependientes del clima como la eólica, mareomotriz, etc. Por ejemplo, poder predecir la velocidad del viento supone vaticinar la cantidad de energía eólica que se puede producir. Además, cualquier tipo de comunicación inalámbrica se puede ver afectada por este fenómeno como veremos a continuación.



5.3.5.2.2.1. La meteorología y el espacio radioeléctrico

Una característica muy importante es poder medir la calidad del espacio radioeléctrico que influye mucho en las comunicaciones inalámbricas y que deteriora la calidad del enlace. Principalmente la humedad, la temperatura y la radiación solar, son los causantes de la pérdida de calidad en las comunicaciones. En un principio la señal física no se ve afectada, pero sí en las transmisiones de los datos de manera inalámbrica (puede suponer una pérdida de paquetes). Esto se debe a la refracción y absorción de la señal en las gotas de agua suspendidas en el aire, es decir la humedad. En función del tamaño y la densidad de las gotas conoceremos la frecuencia límite. A altas frecuencias (más de 10GHz) es un factor más importante. Cuando la gota es más grande que la longitud de onda esta se considera un obstáculo, generando ruido en la señal. En cambio, cuando la longitud es menor esta puede “esquivarse” con mayor facilidad. Esto nos permite saber qué frecuencias son mejores para la comunicación. Si somos capaces de monitorizar la calidad de las comunicaciones, y modificar los parámetros (potencia, frecuencia, ancho de banda) de la misma, podremos mantener una mejora continua. Gracias a esta realimentación no solo se pueden ensayar las comunicaciones en todas las condiciones climáticas, también analizar los ruidos debidos a otros factores. El objetivo es siempre optimizar la cobertura y la calidad de las comunicaciones.

No todos los parámetros meteorológicos afectan a las señales inalámbricas, como es el caso del viento. En cambio, hay otros parámetros que sí tienen relación directa con la calidad del enlace, como es la humedad, que se ve condicionada por fenómenos de lluvia, nieve, nubes, granizo y tormentas, siendo esta ultima la más desfavorable. Estas condiciones producen un fenómeno de atenuación en la señal, impidiendo tener un mayor alcance.

En definitiva, la meteorología no solo afecta a la seguridad de los ingenios, también en el ámbito de las comunicaciones, esencial en un sistema de transporte automatizado.

5.3.5.2.3. Servicio de estado del entorno de navegación

El estado de los entornos de navegación, incluyendo el conjunto de viales que se encuentran distribuidos en ellos, es otro parámetro fundamental pues permite conocer, de antemano, algunos de los peligros a los que se enfrentan los ingenios. Estos datos determinarán qué ingenios podrán circular por ciertas vías, dependiendo de sus características técnicas, por ejemplo, si posee ruedas de invierno, estará capacitado para navegar por carreteras con nieve.

Durante el desplazamiento de un ingenio por las carreteras, encontrarse el camino cortado, con obras u obstáculos, puede suponer un retraso en la llegada a su destino. Por eso es de vital importancia conocer el estado por donde circulan los ingenios, de esta manera aumentamos la seguridad. Además, aporta una mayor eficiencia, pues si una carretera se encuentra cortada, la desviación puede ser de muchos kilómetros y si conocemos su estado con anterioridad, se puede evitar esta desviación. Este método garantiza la disponibilidad o no del vial, sin que ningún ingenio se quede atascado. Algunos casos que pueden darse y que impiden la circulación de ingenios son: caída de objetos a la calzada, incendios forestales, accidentes, etc., en el caso terrestre. En la navegación aérea y marina es más difícil encontrarse con situaciones de vías cortadas, debido a la amplitud del espacio



aéreo y del mar respectivamente. Pueden surgir vías cortadas en los aeropuertos o puertos, o en los canales marinos. Para notificar estas situaciones, se comunicará mediante alertas.

En cuanto a los requerimientos de la red, la latencia no afecta, pero sí que es esencial que el mensaje llegue al CCT, es decir, sí que es necesario recibir una confirmación que verifique su llegada. Los mensajes que se envían desde los dispositivos que forman estos servicios ocupan poco y serán los que se envíen de manera rutinaria. Cuando exista un problema, se enviarán las imágenes o vídeos y estos requieren un gran ancho de banda. El CCT siempre podrá visualizar las cámaras cuando lo considere necesario o recopilar los vídeos que se hayan grabado. Habitualmente, el procesamiento de las imágenes se realizará in-situ con el fin de reducir el consumo de recursos de la infraestructura. En condiciones normales existirá un procesamiento de imágenes para el envío de alertas. En cualquier caso, el CCT siempre será notificado de todas las incidencias. Cuando se produzca una incidencia, esta será almacenada (por ejemplo, en forma de imágenes) para enviárselas al CCT y que se evalúe la situación.

Entre los elementos que se pueden encontrar, dentro de este servicio, hay cámaras asociadas con un software de identificación de objetos, para notificar posibles obstáculos o accidentes. Existen otros sensores que son capaces de medir la calidad del estado de la vía, como termopares o medidores de agua en el asfalto, entre otros.

Las características de la navegación, y las infraestructuras necesarias para ella en los diferentes contextos, hacen que las tareas de mantenimiento del vial tengan especial relevancia en la navegación terrestre, al requerir de una infraestructura específica y estar los viales perfectamente acotados en ella. El conjunto de sensores de la red de geobalizas que se despliegan permiten un análisis y evaluación del estado de esta infraestructura, y optimizar así las tareas de mantenimiento.

5.3.5.2.4. Servicio de iluminación

La iluminación de los viales tiene un papel muy importante en la navegación, y representa unos costes importantes de instalación, mantenimiento y consumo energético. El despliegue de sensores con tecnología de gestión inteligente de la luz tendrá un papel destacado dentro de la red de geobalizas. Entre estos sensores se encuentran los que detectan movimiento y los que controlan la luminosidad. En condiciones de no presencia de ingenios, las luminarias están en modo “baja potencia”. Cuando detectan movimiento, las luminarias se regularán de acuerdo a la luz que tiene el entorno y la luz que se necesite. Por ejemplo, si está atardeciendo se iluminará lo necesario para tener una correcta visibilidad. Desde el CCT se podrá regular y controlar este sistema, pudiendo dotar a ciertas vías de luminosidad permanente, o apagarlas en caso de que exista algún evento o irregularidad (por ejemplo, un accidente, una incidencia, una cabalgata, un espectáculo, etc.). De la misma forma se podría extender su ámbito de aplicación a la detección de personas en las calles, y realizar una iluminación selectiva en función de las necesidades de cada momento.

No solo se consigue una reducción del coste energético, también se contribuye a la reducción de la contaminación lumínica. Este tipo de contaminación impide ver el firmamento y sus constelaciones, debido a la cantidad de luz que emitimos de forma



artificial, especialmente en horario nocturno. Es una contribución añadida al objetivo general de recuperar las ciudades para las personas.

Como resumen, en cuanto a dispositivos que forman parte de este servicio encontramos medidores de luminosidad, repartidos por los entornos de navegación, además de sensores de presencia. Los primeros deberán captar solamente el espectro visible, pues cualquier otra longitud de onda sería invisible para el ojo humano (es decir, que captará solamente los objetos físicos). En cuanto a los sensores de presencia deben tener un gran alcance para evitar la colocación masiva de los mismos ya que suponen un coste importante.

5.3.5.2.5. Servicio de gestión energética

Uno de los principales retos a los que se enfrenta la electrificación del parque móvil es la preparación de la infraestructura necesaria para dar servicio a millones de ingenios. Por un lado, hay que incrementar la capacidad de la red eléctrica para que la recarga energética de los ingenios no represente un compromiso para el resto de servicios y actividades que consumen energía, en especial en los núcleos urbanos. En segundo lugar, es importante trabajar en la generación sostenible de esta energía eléctrica y el almacenamiento de la misma. Además, hay que preparar las estaciones de recarga de los ingenios o electrolineras. La logística de la recarga tendrá un papel destacado. Y no menos importante, la gestión y despacho de esta energía mediante las herramientas de software que permitan su optimización. La existencia de millones de ingenios distribuidos por el territorio nacional podría servir para usar a los propios ingenios como estaciones de almacenamiento de energía, que podrían cederla a la red cuando no estén en funcionamiento o en situaciones de necesidad.

Actualmente el proceso de recarga energética de un vehículo es un proceso manual. En un sistema de transporte automatizado este paradigma se pone en cuestión, siendo susceptible de la automatización del mismo. Una de las ventajas de los ingenios autónomos es su capacidad para operar las 24 horas del día. No obstante, las personas no tienen las mismas necesidades de movilidad durante todo el día, lo cual significa que habrá muchas horas en las que el ingenio no esté realizando ninguna misión, y se pueda aprovechar para las tareas de recarga. En el transporte de mercancías el periodo de inactividad es menor, y es más importante la optimización de los periodos de recarga. Estas cuestiones se analizarán más adelante en la tesis.

La existencia de un Centro de Control de Tráfico que dispone del conocimiento de los principales parámetros que afectan al tráfico, permite plantear la optimización de este proceso. Con el conocimiento de las rutas existentes, las características de las mismas y de los ingenios que las desempeñan y la información sobre el estado de la Red S3, gracias a la red de geobalizas, posibilita realizar previsiones sobre las demandas de energía eléctrica que se necesitarán en las diferentes estaciones de recarga a según qué horas.

Las estaciones de recarga estarán equipadas con sensores que permitan medir parámetros como el estado de la estación, el número de plazas de recarga disponibles, el tipo de conectores, el tipo de carga y la energía almacenada, entre otros.



5.3.5.2.6. Servicio de información

La digitalización es uno de los procesos más extendidos en la actualidad, cuyo objetivo consiste en hacer digital y conectar una gran cantidad de sistemas. En el sistema de transporte automatizado es importante tener en cuenta a las personas, peatones o usuarios, y diseñar los procesos de comunicación con ellos. La presencia de paneles informativos a lo largo de los viales, y en los propios ingenios, será importante. El objetivo principal de este servicio es dar a conocer la información relevante asociada al tráfico para la población general. Entre la información que se puede mostrar esta la relacionada con la salud: avisos sobre alergias, contaminación, radiación UV, temperatura, la hora, etc. También se puede dar información sobre eventos culturales o el estado del tráfico en tiempo real. Otro posible uso consiste en retransmitir contenido en directo a grandes masas, como pueden ser los acontecimientos deportivos, conciertos, eventos, etc.

Estos paneles deben ser respetuosos con el entorno urbano, especialmente en lugares de protección municipal como los cascos históricos. En definitiva, estos elementos se deben mimetizar con el entorno.

En cuanto a las comunicaciones hay que tener en cuenta que el ancho de banda requerido depende en gran medida del caso en el que nos encontremos. Por ejemplo, para poder retransmitir videos en alta resolución, en las pantallas digitales, es necesario tener un gran ancho de banda y una baja latencia. Sin embargo, para proporcionar información sobre la temperatura o la hora se necesita enviar poca cantidad de datos y la latencia es indiferente.

Para este último caso, las pantallas contarán con una memoria interna para almacenar el contenido, de forma que se pueda mantener en el tiempo y repetir si fuera necesario. Con esto conseguimos un menor uso de la red. Por el contrario, si nos centramos en la retransmisión de video, se hará uso del *buffer*, el cual almacena el contenido que se reproducirá en los próximos segundos. Con este sistema se garantiza que la imagen no se corte en caso de estar ocupada la red. De esta forma, las necesidades de latencia o la pérdida de paquetes se ven disminuidas. Estos dispositivos se comunican de forma habitual unidireccionalmente, es decir, solamente reciben los datos del CCT. De manera excepcional se pueden comunicar con el CCT, si detectan algún fallo o problema en su sistema, o no reciben la información correcta porque el mensaje esté corrupto o con mucho ruido y sea necesario reenviarlo.

Para llevar a cabo este servicio se requiere de unos dispositivos, en este caso, paneles luminosos. Pueden ser pantallas digitales de gran formato o paneles luminosos en los que solo se puede mostrar texto. Estos paneles deben soportar las inclemencias meteorológicas y ser visibles en condiciones de luminosidad adversas. Su colocación y tipo de dispositivo atenderá a los criterios de: visibilidad, número de usuarios, electrificación, etc., es decir, lugares estratégicos y con el menor coste posible.

La prioridad de este tipo de mensajes es baja, pues no es una condición indispensable para poder llevar a cabo el desplazamiento de los ingenios.



5.3.5.2.7. Servicio de bienestar

La calidad de vida es una cuestión vital y estratégica en cualquier sociedad. Al comienzo de esta tesis se analizó el elevado riesgo que supone el actual sistema de transporte para la salud de las personas, en especial en los núcleos urbanos (apartado 2.1).

Analizar los factores de riesgo para la salud es esencial. La recolección de datos relativos a la salud de la población permite actuar de forma más eficiente. Entre las variables a medir y enviar estarían: el ruido, la contaminación por partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), la contaminación por compuestos nocivos (CO, NO_x, SO_x, O₃), el polen, la radiación UV, etc.

Las necesidades comunicativas de los medidores mencionados son escasas. Los resultados de las mediciones no varían rápidamente por lo que se necesita enviar los datos de forma esporádica. Estos datos tienen un peso mínimo. La prioridad que tienen estos mensajes es mínima, pues se enviarán cuando la red esté disponible.

En el mercado existen muchos dispositivos orientados a medir la calidad ambiental. La utilidad y el precio de los sensores son clave para la viabilidad, por lo que se requiere una solución de compromiso. Destacamos los siguientes dispositivos: medidores de radiación UV, partículas y polen además del sonómetro. Estos envían información mediante eventos cada cierto tiempo. De esta manera se puede tener un histórico de los datos, lo que aporta mayor valor.

5.3.5.2.8. Servicio de avituallamiento

Las zonas de avituallamiento son infraestructuras distribuidas en los entornos de navegación. En ellas los ingenios realizan tareas para lograr con éxito las operaciones. Entre los servicios que se ofrece a los ingenios están: los intercambiadores, las reparaciones, las inspecciones y las tareas de mantenimiento, entre otros. Hay que saber distinguir los diferentes tipos de estaciones, pues todas no están orientadas a los mismos propósitos, ya que cada una tiene sus propias necesidades.

El hecho de tener monitorizados los lugares de avituallamiento supone dotar de valor añadido a la estación de servicio. Añadir conectividad a estas instalaciones mejora la eficiencia de los servicios. Si conocemos parámetros como el estado de carga, el tiempo de reparaciones, etc. los viajes de media y larga distancia son más fáciles de gestionar.

Equipar con inteligencia y conectividad a las instalaciones de avituallamiento sirve para mejorar la eficiencia en los trayectos. En este caso, las zonas de avituallamiento se gestionarán con un control local, pero siempre informando de su estado al Centro de Control de Tráfico. De ante mano el CCT contará con información relativa a estas instalaciones: número de plazas, tipo de servicios que ofrece, localización etc.

Los intercambiadores o centros logísticos son infraestructuras en las que se realizan trasbordos de pasajeros o mercancías de unos ingenios a otros. La monitorización de estos centros es fundamental para la gestión de los flujos de tráfico. Los centros de mantenimiento son instalaciones donde se realizan tareas rutinarias de mantenimiento y revisión de los ingenios, que dependerán del tipo de ingenio en cuestión. Los centros de reparación están especializados en el arreglo de las averías que pudiera sufrir un ingenio.



Los servicios de avituallamiento contarán con inteligencia propia, además de conectividad. Se notificarán los cambios sustanciales que surjan en ellos, como la disponibilidad de plaza, el tiempo medio de uso, etc. No requieren gran ancho de banda y las comunicaciones se realizarán mediante eventos, cuando sea oportuno. También el CCT podrá solicitar los mencionados datos.

Para analizar el estado de estas estaciones de servicio inteligentes se contará con dispositivos específicos. Entre ellos habrá analizadores de redes eléctricas conectados a la red, capaces de medir las tensiones, corrientes, armónicos, etc. También habrá dispositivos de presencia, para contabilizar el número de plazas disponibles. Y las herramientas de diagnóstico que tienen los centros de mantenimiento.

Los mensajes se enviarán mediante eventos, sin una gran necesidad de banda ancha. Los datos no tienen un carácter urgente, pero sí es necesario que se encuentre actualizado todo el tiempo, para asegurarnos de que hay plazas o de que la infraestructura está disponible.

5.3.5.2.9. Servicio de gestión de basuras

Este servicio tiene unas peculiaridades respecto a otros que se han relatado. La recogida de basuras siempre ha de estar disponible, es decir, tal y como está planteado actualmente, las personas no tienen un horario establecido para depositar los deshechos, ni una cantidad determinada, ni asignado un contenedor concreto, por lo que, en determinadas circunstancias, puede darse el caso de que los contenedores se llenen o desborden. Esto suele pasar principalmente en las basuras que se generan en los núcleos urbanos de forma diaria. Las concentraciones de estos residuos es un riesgo para la salud y foco de malos olores.

Monitorizar la cantidad de basura depositada en los contenedores supone una gestión más eficaz a la hora de la recogida de la basura. Además, los ingenios encargados de esta misión podrán optimizar los recorridos en función del estado de los contenedores, o utilizar ingenios más pequeños que satisfagan las necesidades de cada momento. Por otra parte, se pueden utilizar estos datos para evaluar la concentración de personas o de la actividad económica de la zona.

El objetivo es conseguir optimizar el uso de los servicios de recogida de basuras, minimizando el número de ingenios necesarios y reducir el recorrido a realizar. Además de ofrecer al ciudadano un mejor servicio. Este servicio se puede soportar por la infraestructura Red S3 y enviar los datos al CCT el cual, o gestiona él directamente el servicio (si ha sido así contratado por un ayuntamiento), o facilita los datos a un tercero, que tenga contratado el servicio.

Si nos referimos a las necesidades en las comunicaciones, se observa que se requiere una conexión con el CCT, que indique el estado de llenado del contenedor (cuando esté lleno o cuando esté a punto de hacerlo se enviará una alerta). Incluso se podría notificar el peso de la mercancía, ya que, existe un peso máximo que pueden admitir los ingenios, y es necesario adaptar el recorrido en función de este parámetro.

En cuanto a los dispositivos, irán incorporados en los contenedores y dotados de conectividad con la red de consistencia. Entre estos dispositivos estarán: las galgas extensiométricas para medir el peso y otros medidores de nivel.

La prioridad de los mensajes no es crítica, los mensajes son enviados mediante eventos cada cierto tiempo.

5.3.5.2.10. Servicio de estacionamiento

El estacionamiento de un ingenio es el proceso que se encuentra al principio y al final de cada una de las rutas o misiones que realiza. La gestión y monitorización de los centros de estacionamiento o parkings es una tarea fundamental en la gestión automatizada del tráfico.

Los dispositivos que se suelen instalar en los aparcamientos son sensores de ocupación de las plazas de aparcamiento, sistemas de cobro, control de accesos, etc. En todos los casos existe un control local encargado de la gestión de todas estas variables. La conexión de este control local con la Red S3 es imprescindible para que el CCT disponga de los datos necesarios, relativos al estado de las infraestructuras de estacionamiento.

Los datos de interés principal son el estado de la infraestructura, si está operativa o cerrada, el número de plazas disponibles, sus características, si están ocupadas o no, y otros posibles servicios auxiliares que pudiera tener la infraestructura.

5.3.6. Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu)

La cooperación entre la gestión automatizada del tráfico y la red de comunicaciones permite la generación del Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu). Es un concepto nuevo que puede llegar a resultar complejo de comprender. El Espacio Automatizado Multicontexto se define como el conjunto de regiones del espacio habilitadas para la navegación segura de los ingenios autónomos.



Figura 5. 18. Representación gráfica del Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu).



Las principales características del EAMu son:

- Tiene cobertura permanente de la Red S3, tanto de comunicaciones como de posicionamiento. Se genera un espacio radioeléctrico específico para la movilidad.
- Está definido sobre el entorno de navegación tridimensional. Su gestión se realiza desde los Centro de Control de Tráfico.
- Es multicontexto. Incluye regiones terrestres, aéreas y marinas por las que se puede realizar la navegación autónoma.
- Es una región libre de obstáculos. El EAMu solamente engloba el espacio por el que pueden navegar los ingenios de forma segura, tanto para ellos mismos como para el entorno y sus elementos. Por ejemplo, en el caso de una calle en una ciudad, el EAMu comprenderá únicamente la región sobre el pavimento de la calzada, las aceras, a pesar de que puedan tener cobertura tanto de comunicaciones como de posicionamiento, no formarán parte del EAMu, puesto que los ingenios no han de circular por las aceras.
- Está monitorizado de manera constante desde los CCT, con servicios como la identificación de ingenios en circulación, estado del vial, etc.

El Espacio Automatizado multicontexto es un nuevo concepto que surge de la unión de dos de los elementos principales del sistema de transporte automatizado, el CCT y la Red S3. En la Figura 5. 18 se realiza una representación gráfica del EAMu que facilita su comprensión.

Destacan dos de las funcionalidades del EAMu. En primer lugar, desde el punto de vista operativo del sistema, proporciona una monitorización en tiempo real para la gestión automatizada del tráfico en los diferentes entornos de navegación.

En segundo lugar, el EAMu juega un papel destacado en la comercialización de los servicios que proporcionará el sistema de transporte automatizado. Los ingenios se tendrán que conectar al EAMu, a este espacio radioeléctrico, para poder disponer del conjunto de servicios que proporcionan la Red S3 y el CCT. Esto significa que los ingenios, sus operadores o propietarios, tendrán que abonar una tarifa por conectarse al EAMu, al igual que ocurre con la red de telefonía móvil. En definitiva, el EAMu es la herramienta de comercialización de los servicios del sistema de transporte automatizado que permitirá la generación de negocio.



6. ESTRUCTURA ADMINISTRATIVA DEL TRANSPORTE EN ESPAÑA Y LEGISLACIÓN NECESARIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE AUTOMATIZADO

Automatizar el transporte de un país es un reto de una complejidad muy elevada desde el punto de vista científico y tecnológico. El diseño conceptual del sistema de transporte automatizado que se presenta en esta tesis doctoral está ideado para tal fin, permitiendo la automatización integral de navegación en los tres contextos, terrestre, aéreo y marino. Sin embargo, la implementación de un sistema de estas características tiene una dependencia muy fuerte de la legislación, que aporte un régimen jurídico para el despliegue de los ingenios y la infraestructura necesaria para la navegación autónoma, cumpliendo con los requerimientos de seguridad y eficiencia establecidos.

Este capítulo de la tesis se centra en el análisis de la actual estructura administrativa del transporte en España, evaluando la legislación vigente, la distribución de competencias entre las diferentes administraciones públicas y los organismos estatales creados para ejercer las respectivas funciones que se les asignan en materia de transporte. De esta forma se puede obtener una radiografía de la organización actual del transporte en el país y evaluar e identificar las leyes, organismos y entidades que se verán afectadas por un sistema de transporte automatizado.

Seguidamente se realiza un estudio sobre las regulaciones necesarias para automatizar el transporte en España, y se propone un conjunto de acciones jurídicas a desarrollar para facilitar su implementación.

6.1. Estructura Administrativa del Transporte Actual en España

La organización de la estructura administrativa del transporte en España se fundamenta en las leyes más básicas del estado, comenzando con la Constitución Española. En materia de transportes la Constitución atribuye competencias al Estado y a las Comunidades Autónomas [186]. En su artículo 149 recoge:

“El Estado tiene competencia exclusiva sobre las siguientes materias:

(...) 20.º Marina mercante y abanderamiento de buques; iluminación de costas y señales marítimas; puertos de interés general; aeropuertos de interés general; control del espacio aéreo, tránsito y transporte aéreo, servicio meteorológico y matriculación de aeronaves.

21.º Ferrocarriles y transportes terrestres que transcurran por el territorio de más de una Comunidad Autónoma; régimen general de comunicaciones; tráfico y circulación de



vehículos a motor; correos y telecomunicaciones; cables aéreos, submarinos y radiocomunicación.”

Mientras que en el artículo 148 recoge:

“Las Comunidades Autónomas podrán asumir competencias en las siguientes materias:

(...) 5.º Los ferrocarriles y carreteras cuyo itinerario se desarrolle íntegramente en el territorio de la Comunidad Autónoma y, en los mismos términos, el transporte desarrollado por estos medios o por cable.

6.º Los puertos de refugio, los puertos y aeropuertos deportivos y, en general, los que no desarrollen actividades comerciales.”

Tomando como referencia básica lo establecido en la Constitución Española, el Estado genera legislación específica y crea organismos públicos para desarrollar estas competencias de transporte y ejercerlas. En el texto constitucional se establece la sectorización del transporte en los tres contextos, terrestre, aéreo y marítimo. También ha de tenerse en cuenta la normativa de los organismos internacionales reconocidos y con competencias en materia de transporte, analizados previamente en el apartado 2.3 de esta tesis. En los siguientes apartados se analiza la organización y legislación del transporte en cada uno de estos contextos a nivel de España.

6.1.1. Organización del Transporte Terrestre

El transporte terrestre se puede organizar en dos grupos principales, el transporte por carretera y el transporte ferroviario. En este apartado se analiza la legislación general de ambos, y posteriormente se detalla la organización de cada uno de ellos.

La regulación legal en el ordenamiento español en relación a lo establecido en los artículos 148 y 149 en materia de transporte terrestre se encuentra recogido en dos leyes principales:

- Ley 16/1987, de 30 de julio, de Ordenación de los Transportes Terrestres.
- Ley Orgánica 5/1987, de 30 de julio, de Delegación de Facultades del Estado en las Comunidades Autónomas en relación con los transportes por carretera y por cable.

La Ley 16/1987 encarga al Ministerio del Interior y al Ministerio de Fomento (actualmente Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana) el desarrollo de las competencias atribuidas al Estado en materia de transporte. Analizamos la normativa y legislación de carácter genérico más relevante en cada uno de ellos.

La regulación que establece la actuación del Ministerio del Interior en materia de transportes es:

- Real Decreto 734/2020, de 4 de agosto, por el que se desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio del Interior.
- Ley 40/2015, de 1 de octubre, de Régimen Jurídico del Sector Público.
- Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial.



- El conjunto de normativas estatales vigentes que regulan la actuación del Ministerio del Interior se pueden consultar en la página oficial del ministerio [187].

La regulación que establece la actuación del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana en materia de transportes es:

- Real Decreto 645/2020, de 7 de julio, por el que se desarrolla la estructura orgánica del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- El conjunto de normativas estatales vigentes que regulan la actuación del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana se pueden consultar en página oficial del ministerio [188].

Por su parte, la Ley Orgánica 5/1987 establece la delegación de las siguientes facultades del Estado en las Comunidades Autónomas [189]:

- Delegación de las facultades de gestión de los servicios de transporte público regular de viajeros, cuyo itinerario discorra por el territorio de más de una Comunidad Autónoma.
- Delegación de las facultades de gestión de los servicios de transporte público discrecional de viajeros prestados al amparo de autorizaciones cuyo ámbito territorial exceda del de una Comunidad Autónoma.
- Delegación de facultades de carácter ejecutivo en materia de transportes privados que discurren por el territorio de varias Comunidades Autónomas.
- Delegación de facultades ejecutivas en materia de las actividades auxiliares y complementarias del transporte, sin perjuicio de las competencias que en su caso correspondan a las Comunidades Autónomas sobre estas materias.
- Delegación de las facultades de gestión en materia de transportes por cable, cuyo itinerario discorra por el territorio de más de una Comunidad Autónoma: teleféricos u otros medios en los que la tracción se haga por cable y no exista camino de rodadura fijo de competencia del Estado y transportes complementarios de estaciones de invierno o esquí.
- Delegación de facultades a cada una de las Comunidades Autónomas en materia de inspección de los servicios y actividades de transporte por carretera y por cable, que se desarrollen dentro de su ámbito territorial, delegación de facultades sancionadoras, independientemente de que los referidos servicios y actividades hayan sido objeto o no de delegación y que esa delegación lo haya sido en su favor o en el de otra Comunidad Autónoma. Se exceptúan de la delegación las funciones de vigilancia del transporte atribuidas a la Guardia Civil, y las funciones relativas a la inspección y control en frontera de los transportes internacionales, e imposición de las correspondientes sanciones.
- Delegación de facultades ejecutivas en materia de arbitraje, respetando la organización, funciones y régimen jurídico de la ley estatal y de sus normas de desarrollo.
- Delegación de funciones administrativas relativas a la adquisición, acreditación y control de la capacitación profesional para el transporte y para las actividades auxiliares y complementarias del mismo.

Esta delegación de facultades se traduce en 17 organizaciones estructurales y desarrollos normativos propios en cada una de las Comunidades Autónomas.

El organigrama de la estructura administrativa Estatal del transporte terrestre está representado en la Figura 6. 1. A continuación, se analizan en detalle las organizaciones del transporte por carretera y el transporte ferroviario.

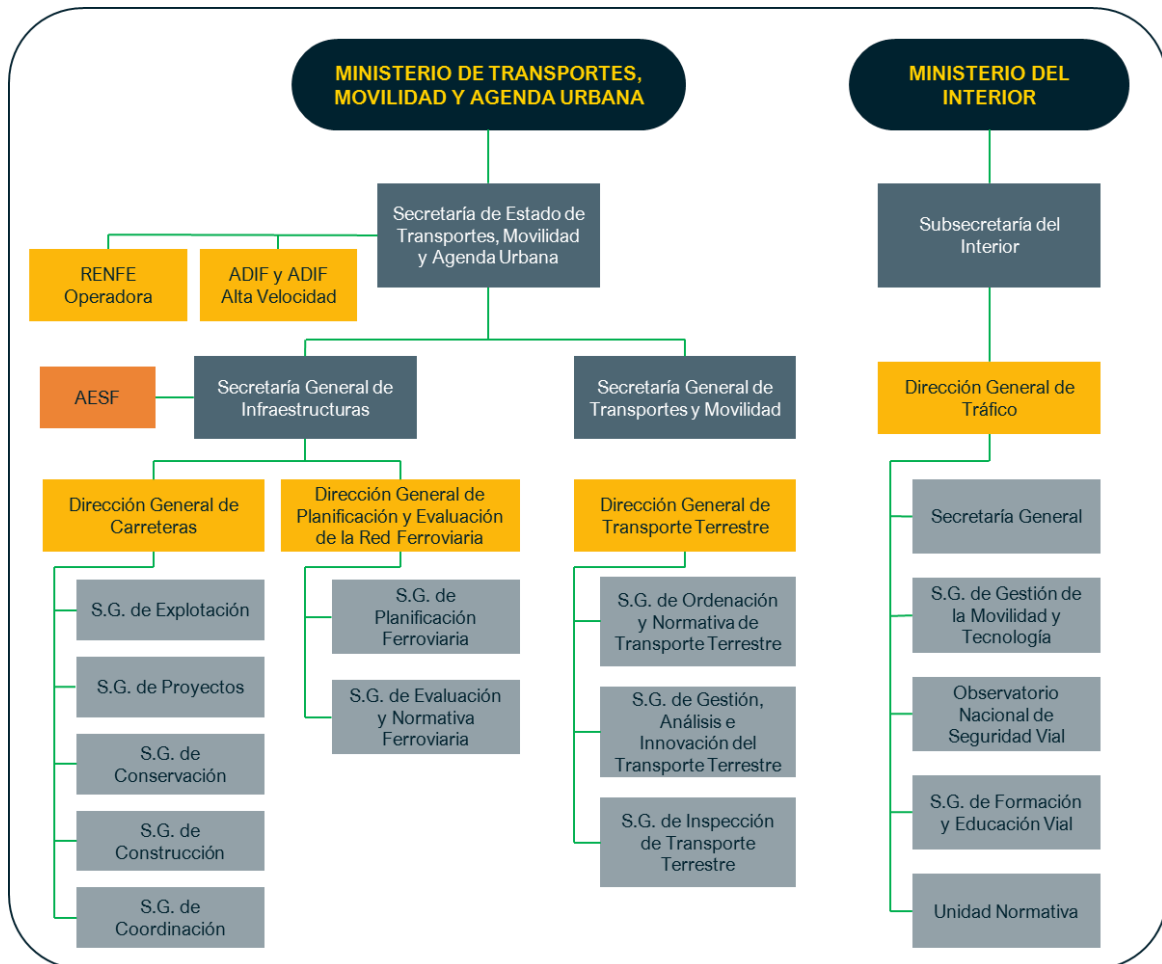


Figura 6. 1. Estructura administrativa del transporte terrestre en España.

6.1.1.1. Transporte por Carretera

La organización del transporte por Carretera en el Estado español está dividida en dos ministerios, el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y el Ministerio del Interior.

El Ministerio de Interior ejerce sus competencias en materia de transporte por carretera a través de la Subsecretaría de Interior, y en concreto en la Dirección General de Tráfico (DGT). Sus funciones más relevantes son [190]:

- La planificación, programación estratégica, gestión de recursos, gestión económica, gestión de metodología, creación de registros informáticos, y gestión de las tecnologías de información y comunicaciones del organismo.
- La elaboración de estudios, propuestas, anteproyectos y proyectos de disposiciones sobre tráfico y seguridad vial, y la coordinación con las Entidades Locales respecto de la normativa estatal que les afecte.



- La tramitación de procedimientos sancionadores en materia de tráfico, la elaboración de instrucciones sobre esta materia y sus procedimientos administrativos relacionados, así como la tramitación de los recursos administrativos y los de declaración de nulidad y de lesividad.
- La coordinación y el establecimiento de directrices sobre los instrumentos jurídicos de colaboración que firme el organismo, así como la garantía del cumplimiento de los derechos y obligaciones sobre protección de datos personales.
- La elaboración de instrucciones sobre vehículos y los procedimientos administrativos relacionados con el Registro de Vehículos, así como facilitar la implantación del vehículo conectado, el desarrollo de la conducción autónoma y el impulso de plataformas tecnológicas para su gestión en el ámbito de las competencias del organismo.
- La regulación, ordenación, gestión, vigilancia y disciplina del tráfico en vías interurbanas y travesías; la implantación, mantenimiento y explotación de los medios y sistemas inteligentes de transporte necesarios, así como propuestas de mejora de la seguridad vial en las vías para reducir la accidentalidad, sin perjuicio de las competencias del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- La dirección de los Centros de Gestión de Tráfico y del Centro de Tratamiento de Denuncias Automatizadas, así como la resolución sobre la instalación de videocámaras y dispositivos para el control, regulación, vigilancia y disciplina del tráfico en el ámbito de la Administración General del Estado.
- El suministro de información sobre el estado del tráfico en tiempo real e incidencias.
- El establecimiento de las directrices para la formación y actuación de los agentes de la autoridad en materia de tráfico y circulación de vehículos, sin perjuicio de las atribuciones de las Corporaciones Locales, con cuyos órganos se instrumentará la colaboración necesaria
- La planificación, elaboración y divulgación de las estadísticas, indicadores y datos sobre accidentes de tráfico y otras materias incluidas en el ámbito de las competencias del organismo, en coordinación con las demás unidades. La coordinación con otros órganos con competencias en materia estadística.
- El desarrollo y gestión del Registro Nacional de Víctimas de Accidentes de Tráfico, velando por la incorporación de todas las fuentes de información relacionadas con las características de los accidentes y sus consecuencias.
- La elaboración y gestión de los planes y estrategias en el ámbito del tráfico y la seguridad vial, tanto generales como referidos a ámbitos y colectivos específicos, en colaboración con los agentes sociales y las Administraciones Públicas.
- La elaboración y gestión de las actuaciones para la mejora de la seguridad vial laboral, en colaboración con otras Administraciones Públicas y agentes sociales.
- Los procesos de consulta y participación, a través del Consejo Superior de Tráfico, Seguridad Vial y Movilidad Sostenible.
- La elaboración y ejecución de los planes de estudios e investigaciones en materia de seguridad vial, factores influyentes e impacto de medidas específicas, en coordinación con el resto de unidades, las instituciones de carácter científico y técnico y otras Administraciones Públicas competentes.
- La gestión de la educación vial, la formación de conductores, la organización de pruebas de aptitud, incluida la formación de examinadores; la regulación, el registro y el control de las escuelas particulares de conductores y de los centros habilitados para la evaluación de las aptitudes psicofísicas de los conductores.



- La determinación de requisitos de aptitud psicofísica para la obtención y renovación de las autorizaciones administrativas para conducir en colaboración con la autoridad sanitaria y de acuerdo con el avance científico y técnico.
- La coordinación y el seguimiento de la actividad en materia de relaciones internacionales del organismo. La planificación y desarrollo de los programas de cooperación en Iberoamérica en materia de tráfico y seguridad vial.

El ejercicio de estas funciones principales, y el resto de funciones asignadas, se distribuye entre los siguientes órganos con nivel de subdirección general: la Secretaría General, la Subdirección General de Gestión de la Movilidad y Tecnología, el Observatorio Nacional de Seguridad Vial, la Subdirección General de Formación y Educación Vial y la Unidad Normativa.

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana ejerce sus competencias por medio de la Secretaría de Estado de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, que a su vez se divide en la Secretaría General de Infraestructuras, de la que depende la Dirección General de Carreteras, y la Secretaría General de Transportes y Movilidad, de la que depende la Dirección General de Transporte Terrestre.

La Dirección General de Transporte Terrestre tiene la función de la ordenación general, en el ámbito del Estado, en materia de transportes por carretera, servicios de transporte ferroviario y transporte por cable. Es un organismo dividido a su vez en tres subdirecciones generales que se distribuyen el conjunto de competencias: la Subdirección General de Ordenación y Normativa de Transporte Terrestre, la Subdirección General de Gestión, Análisis e Innovación del Transporte Terrestre y la Subdirección General de Inspección de Transporte Terrestre [191].

La Dirección General de Carreteras tiene la misión de gestionar la planificación, los proyectos, construcción, conservación y explotación de las carreteras estatales. Esta Dirección General se estructura en los siguientes órganos entre los que se reparten las competencias de la misma: la Subdirección General de Explotación, la Subdirección General de Proyectos, la Subdirección General de Conservación, la Subdirección General de Construcción y la Subdirección General de Coordinación [192].

Adicionalmente a esta organización del Estado, existen dos tipos de organizaciones más: las administraciones autonómicas, con 17 estructuras y normativas específicas, y las administraciones locales, propietarias de la gran mayoría de calles y carreteras del territorio nacional.

En el ámbito local, en primer lugar, hay que hacer referencia a la Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local, que establece en su artículo 3 la definición de Entidades Locales [193]:

"1. Son Entidades Locales territoriales: a) El Municipio. b) La Provincia. c) La Isla en los archipiélagos balear y canario.

2. Gozan, asimismo, de la condición de Entidades Locales: a) Las Comarcas u otras entidades que agrupan varios Municipios, instituidas por las Comunidades Autónomas de conformidad con esta Ley y los correspondientes Estatutos de Autonomía. b) Las Áreas Metropolitanas. c) Las Mancomunidades de Municipios."



La citada Ley otorga en su artículo 25 únicamente competencias en materia de tráfico a los municipios, sin embargo, en determinadas situaciones el resto de organismos locales podrían asumir algunas competencias.

La delegación de las competencias del tráfico a las Entidades Locales se realiza en el Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial. En su artículo 7 se establecen las competencias que corresponden a los municipios:

- a) *“La regulación, ordenación, gestión, vigilancia y disciplina, por medio de agentes propios, del tráfico en las vías urbanas de su titularidad, así como la denuncia de las infracciones que se cometan en dichas vías y la sanción de las mismas cuando no esté expresamente atribuida a otra Administración.*
- b) *La regulación mediante ordenanza municipal de circulación, de los usos de las vías urbanas, haciendo compatible la equitativa distribución de los aparcamientos entre todos los usuarios con la necesaria fluidez del tráfico rodado y con el uso peatonal de las calles, así como el establecimiento de medidas de estacionamiento limitado, con el fin de garantizar la rotación de los aparcamientos, prestando especial atención a las necesidades de las personas con discapacidad que tienen reducida su movilidad y que utilizan vehículos, todo ello con el fin de favorecer su integración social.*
- c) *La inmovilización de los vehículos en vías urbanas cuando no dispongan de título que habilite el estacionamiento en zonas limitadas en tiempo o excedan de la autorización concedida, hasta que se logre la identificación de su conductor.*
- d) *La retirada de los vehículos de las vías urbanas y su posterior depósito cuando obstaculicen, dificulten o supongan un peligro para la circulación, o se encuentren incorrectamente aparcados en las zonas de estacionamiento restringido, en las condiciones previstas para la inmovilización en este mismo artículo. Las bicicletas sólo podrán ser retiradas y llevadas al correspondiente depósito si están abandonadas o si, estando amarradas, dificultan la circulación de vehículos o personas o dañan el mobiliario urbano.*
- e) *Igualmente, la retirada de vehículos en las vías interurbanas y el posterior depósito de éstos, en los términos que reglamentariamente se determine.*
- f) *La autorización de pruebas deportivas cuando discurran íntegra y exclusivamente por el casco urbano, exceptuadas las travesías.*
- g) *La realización de las pruebas a que alude el artículo 5.o) en las vías urbanas, en los términos que reglamentariamente se determine.*
- h) *El cierre de vías urbanas cuando sea necesario.*
- i) *La restricción de la circulación a determinados vehículos en vías urbanas por motivos medioambientales.”*

A modo de resumen, con carácter genérico y las salvedades y matices pertinentes, se puede observar que la actuación del Estado en materia de transporte por carretera se divide, por un lado, en las infraestructuras y su gestión, asignadas al Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, y por otro en el tráfico y su gestión, asignadas al Ministerio del Interior. Se delegan las facultades propias a la Comunidades Autónomas en lo relativo a las infraestructuras de su propiedad y su gestión. Y, por último, se delegan las competencias de tráfico a los municipios en las calles que son de su propiedad. Existen por



tanto cientos de administraciones públicas en España con competencias sobre el transporte terrestre.

6.1.1.2. Transporte Ferroviario

Las competencias relativas al transporte ferroviario las ejerce el Estado a través del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Al igual que ocurre con el transporte por carretera, corresponde a la Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana la definición y ejecución de las políticas relativas a la planificación y realización de infraestructuras ferroviarias y la organización general del transporte ferroviario. De esta Secretaría de Estado dependen por un lado dos secretarías generales, y por otro lado RENFE y ADIF [194].

La Secretaría General de Infraestructuras, en lo relativo al transporte ferroviario, tiene por un lado la Dirección General de Planificación y Evaluación de la Red Ferroviaria, y por otro lado AESF.

La Dirección General de Planificación y Evaluación de la Red Ferroviaria se encarga de:

- La realización de estudios de carácter prospectivo, económico-financiero y territorial, así como del seguimiento de los planes y programas de infraestructuras de transporte ferroviario del Departamento y la elaboración y seguimiento de la planificación de infraestructuras ferroviarias.
- La elaboración y seguimiento de estudios informativos, anteproyectos y, excepcionalmente proyectos ferroviarios.
- Las actuaciones expropiatorias en relación a las infraestructuras ferroviarias.
- La elaboración de disposiciones de carácter general relativos a las infraestructuras ferroviarias.

De esta dirección general, dependen con nivel orgánico de subdirección: la Subdirección General de Planificación Ferroviaria y la Subdirección General de Evaluación y Normativa Ferroviaria, que se reparten las competencias [195].

La Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria (AESF), es un organismo público cuyo ámbito de competencias está en la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG) y los servicios que por ella discurren. En dicho ámbito ejercerá como autoridad responsable de la seguridad ferroviaria, realizando la ordenación, inspección y supervisión de la seguridad de los elementos del sistema ferroviario: infraestructuras, material rodante, personal ferroviario y operación ferroviaria [196].

La segunda secretaría general dependiente de esta secretaría de estado es la Secretaría General de Transportes y Movilidad, compartida con el transporte por carretera, que canaliza a través de la Dirección General de Transporte Terrestre, el ejercicio de las siguientes funciones:

- La ordenación general y regulación del sistema de transporte ferroviario, que incluye la elaboración de proyectos normativos mediante los que se establezcan reglas básicas del mercado ferroviario, participación en la elaboración de normas de la Unión Europea y la elaboración de reglas de coordinación sobre competencias delegadas a las CCAA.



- Las propuestas, tramitación y adjudicación, así como el control y seguimiento de las obligaciones de servicio público en el transporte de viajeros por ferrocarril, así como el otorgamiento de ayudas a la mejora del transporte ferroviario y la realización de estudios y elaboración de planes de actuaciones administrativas sobre dichas materias.
- La inspección y control del cumplimiento de las normas reguladoras del servicio de transporte por ferrocarril y de sus actividades auxiliares y complementarias, así como la aplicación del correspondiente régimen sancionador, y la coordinación de estas funciones cuando hayan sido delegadas en las Comunidades Autónomas.

En esta dirección general se distribuyen las competencias entre tres órganos con nivel de subdirección general: la Subdirección General de Ordenación y Normativa de Transporte Terrestre, la Subdirección General de Gestión, Análisis e Innovación del Transporte Terrestre y la Subdirección General de Inspección de Transporte Terrestre [191].

RENFE es una entidad pública empresarial cuyo objeto es la prestación de servicios de transporte de viajeros y mercancías y de otros servicios o actividades complementarias vinculadas al transporte ferroviario. Se encarga a su vez del mantenimiento y la gestión de material móvil ferroviario.

ADIF es el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, un ente público empresarial cuyo objeto es la administración de infraestructuras ferroviarias (vías, estaciones, terminales de mercancías, etc.), la gestión de circulación ferroviaria, la adjudicación de capacidad a los operadores ferroviarios y la percepción de cánones por el uso de la infraestructura, estaciones y terminales de mercancías [194].

6.1.2. Organización del Transporte Aéreo

La normativa internacional en transporte aéreo tiene un papel destacado, tal y como se analizó en el apartado 2.3.2.1. Por un lado, están los tratados y convenios internacionales que España ha suscrito, y por otro lado está la normativa de la Unión Europea. Estas regulaciones se pueden consultar en la página oficial del ministerio [197]. En este apartado se analiza la organización nacional del transporte aéreo.

El Estado español ejerce las competencias relativas al transporte aéreo asignadas por el citado artículo 149 de la Constitución por el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. Las leyes más relevantes en cuanto a la regulación de estas competencias son:

- Ley 48/1960 de 21 de julio, sobre Navegación Aérea.
- Ley 209/1964 de 24 de diciembre, Penal y Procesal de la Navegación Aérea.
- Ley Orgánica 1/1986 de 8 de enero, de supresión de la Jurisdicción Penal Aeronáutica y adecuación de penas por infracciones aeronáuticas.
- Ley 21/2003 de 7 de julio, de Seguridad Aérea.
- Real Decreto 384/2015 de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de matriculación de aeronaves civiles.

La misión del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana consiste en definir, en sentido amplio, la política y la normativa en el ámbito de la aviación civil. Sus principales áreas de actividad son las infraestructuras aeroportuarias y de navegación aérea, el transporte aéreo, la aviación general, los profesionales, las entidades que desarrollan

actividades relacionadas con la aviación civil y los usuarios finales de estas actividades. La organización del transporte aéreo en España se presenta en la Figura 6. 2.

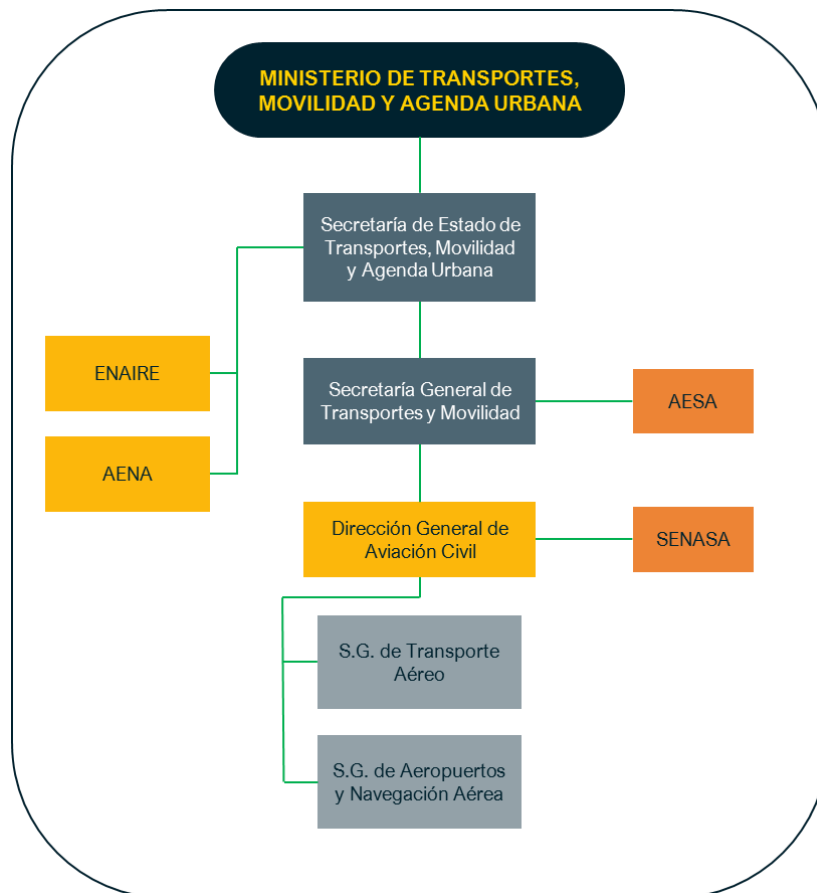


Figura 6. 2. Estructura administrativa del transporte aéreo en España.

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana canaliza su actividad en materia de transporte aéreo por medio de la Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. De esta secretaría de estado dependen, por una parte, la Secretaría General de Transportes y Movilidad y, por otra parte, los organismos ENAIRE y AENA.

ENAIRE es una entidad pública empresarial que actúa como proveedor de servicios de navegación aérea y de información aeronáutica en Europa. Gestiona el espacio aéreo español sobre un territorio de 2.190.000 kilómetros cuadrados. Consta de 5 centros de control, 21 torres de control y una red de infraestructuras y equipamientos aeronáuticos. Presta los servicios de tránsito aéreo de control de área, aproximación y aeródromo, así como los de información de vuelo, alerta y asesoramiento. Es el proveedor de servicios de comunicaciones, navegación y vigilancia en todo el espacio aéreo español y en los aeropuertos de la red AENA [198].

AENA es una entidad pública empresarial que gestiona los aeropuertos y helipuertos españoles de interés general. Su objeto es la gestión de todas las actividades relacionadas con los aeropuertos, como son la ordenación, la dirección, la coordinación, la explotación, la conservación y la administración, entre otras. Este organismo gestiona 46 aeropuertos y 2 helipuertos en España, además de participar directa o indirectamente en la gestión de otros 23 aeropuertos internacionales [199].



De la Secretaría General de Transportes y Movilidad depende la Dirección General de Aviación Civil y AESA. La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) es el organismo del Estado que vela para que se cumplan las normas de aviación civil en el conjunto de la actividad aeronáutica de España. Tiene las misiones de supervisión, inspección y ordenación del transporte aéreo, a navegación aérea y la seguridad aeroportuaria. Evalúa los riesgos de seguridad en el transporte y tiene potestad sancionadora ante las infracciones de las normas de aviación civil [95].

La Dirección General de Aviación Civil es el órgano que diseña la estrategia y define la política aeronáutica, elabora y propone normativa y coordina a los organismos, entes y entidades adscritas con funciones en aviación civil. El ejercicio de sus funciones lo ejecuta por medio de dos órganos con carácter de subdirección general: la Subdirección General de Aeropuertos y Navegación Aérea y la Subdirección General de Transporte Aéreo [200]. De esta dirección general también depende SENASA.

La Subdirección General de Aeropuertos y Navegación Aérea se estructura en tres áreas principales:

- Área de Estrategia Aeroportuaria. Su objeto es la planificación aeroportuaria, la integración territorial de los aeropuertos, los estudios y gestión de las cuestiones medioambientales, la normativa jurídica del ámbito aeroportuario y la comunicación y colaboración nacional.
- Área de Política de Estrategia de Navegación Aérea. Gestiona la normativa internacional, en el marco de la Unión Europea con el Cielo Único Europeo y EASA, así como el seguimiento de las iniciativas de la OACI y la coordinación internacional. De la misma forma se encarga de la gestión normativa y coordinación en el ámbito nacional.
- Área de Política de Espacio Aéreo. Se encarga de la coordinación, gestión y seguimiento del espacio aéreo español y todas las actividades derivadas. Elabora la normativa relacionada con el espacio aéreo y se encarga de la colaboración nacional e internacional en este ámbito.

La Subdirección General de Transporte Aéreo se divide en cuatro áreas:

- Área de Convenios Internacionales. Se encarga de la negociación y adopción de acuerdos internacionales de transporte aéreo y navegación aérea.
- Área de Estudios. Elabora estudios y formula propuestas sobre política y estrategia del sector aéreo e innovación. Planifica, ordena y elabora propuestas de normativa del sector.
- Área de Explotación. Se encarga del registro y aprobación de las tarifas aplicadas por las compañías aéreas. Gestiona el área económica del organismo y hace propuestas de obligación de servicios públicos en aviación civil.
- Área de Huelgas. Se encarga de elaborar las propuestas de los servicios mínimos para asegurar la prestación de los servicios esenciales de transporte aéreo, terrestre y marítimo.

SENASA (Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica) es una entidad pública empresarial, cuyo origen está en el centro de adiestramiento del Ejército del Aire. Proporciona asistencia técnica especializada a las entidades públicas del sector aeronáutico español en diversas áreas: seguridad operacional y física, navegación



aérea, meteorología, aeropuertos, servidumbres aeronáuticas y sostenibilidad medioambiental, entre otras [201].

6.1.3. Organización del Transporte Marítimo

El Estado español ejerce las competencias de transporte marítimo asignadas por el citado artículo 149 de la Constitución por el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, en concreto a través de la Dirección General de la Marina Mercante. Se establece la consecución de los siguientes objetivos:

- La tutela de la seguridad de la vida humana en el mar.
- La tutela de la seguridad de la navegación marítima.
- La protección del medio ambiente marino.
- La existencia de los servicios de transporte marítimo que demanden las necesidades del país.
- El mantenimiento de las navegaciones de interés público.

Las competencias más destacadas que tiene son [202]:

- Las relativas a la seguridad de la vida humana en la mar y de la navegación en relación con todas las plataformas fijas o los buques civiles españoles, así como los extranjeros cuando se encuentren en aguas situadas en zonas en las que España ejerza soberanía, derechos soberanos o jurisdicción y de acuerdo con el Derecho Internacional.
- Las relativas al salvamento de la vida humana en la mar; así como la limpieza de las aguas marítimas y la lucha contra la contaminación del medio marino producida desde buques o plataformas fijas.
- Las referentes al control de la situación, del registro y del abanderamiento de todos los buques civiles españoles, así como la regulación del despacho.
- La ordenación y ejecución de las inspecciones y controles técnicos, radioeléctricos, de seguridad y de prevención de la contaminación, de todos los buques civiles españoles y de los extranjeros en los casos autorizados por los acuerdos internacionales.
- El registro y control del personal marítimo civil, la determinación de las condiciones generales de idoneidad, profesionalidad y titulación para formar parte de las dotaciones de todos los buques civiles españoles, sin perjuicio de las competencias del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en materia de capacitación y de enseñanzas de formación profesional náutico-pesquera y subacuático-pesquera respecto de las dotaciones de los buques pesqueros.
- La participación en la Comisión de Faros u otros instrumentos de colaboración institucional en materia de señalización marítima.
- El ejercicio de la potestad sancionadora.

Sin perjuicio de cualesquiera otras competencias que le sean atribuidas en la legislación vigente, el ordenamiento legal que establece estas regulaciones está determinado por las siguientes leyes:

- Ley 14/2014, de 24 de julio, de Navegación Marítima.



- Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante.
- Ley 34/1998, de 7 de octubre, del sector de hidrocarburos.
- Real Decreto 210/2004, de 6 de febrero, por el que se establece un sistema de seguimiento y de información sobre el tráfico marítimo.
- Real Decreto 145/1989, de 20 de enero, por el que se aprueba el reglamento nacional de admisión, manipulación y almacenamiento de mercancías peligrosas en los puertos.

De acuerdo a lo establecido en el Real Decreto Legislativo 2/2011, de 5 de septiembre, por un lado, está la Dirección General de la Marina Mercante, que es el órgano competente para la ordenación de la navegación marítima y, por otra parte, está Puertos del Estado, que tiene competencias de coordinación y control de eficiencia del sistema portuario de titularidad estatal. La estructura administrativa del transporte marítimo en España se representa de manera gráfica en la Figura 6. 3.

La estructuración de la Dirección General de la Marina Mercante se establece en el Real Decreto 953/2018, de 27 de julio, determinando tres órganos con categoría de subdirección general: la Subdirección General de Seguridad, Contaminación e Inspección Marítima; la Subdirección General de Normativa Marítima y Cooperación Internacional; y la Subdirección General de Coordinación y Gestión Administrativa. En la misma Dirección General de la Marina Mercante están designadas las Capitanías Marítimas, como los órganos periféricos de la Administración Marítima Española. Sus principales funciones son la ordenación de la navegación, la seguridad marítima, la prevención y lucha contra la contaminación del medio marino y asuntos generales, jurídicos y expedientes sancionadores. A su vez existen los Distritos Marítimos, que se configuran como órganos desconcentrados con los que se pretende atender las necesidades puntuales del sector marítimo.

La Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR) es una entidad pública empresarial encargada de la seguridad en aguas del territorio español, dependiente de la Dirección General de la Marina Mercante. Sus objetivos principales son el salvamento de la vida humana en la mar, prevención y lucha contra la contaminación del medio marino, prestación de los servicios de seguimiento y ayuda al tráfico marítimo, de seguridad marítima y la navegación, remolque y embarcaciones auxiliares y aquellos complementarios de los anteriores [203].

Puertos del Estado es un organismo integrado por 46 puertos de interés general, gestionados por 28 Autoridades Portuarias. Sus competencias principales son [204]:

- La ejecución de la política portuaria del Gobierno y la coordinación y el control de eficiencia del sistema portuario de titularidad estatal, en los términos previstos en esta ley.
- La coordinación general con los diferentes órganos de la Administración General del Estado, que establecen controles en los espacios portuarios y con los modos de transporte en el ámbito de competencia estatal, desde el punto de vista de la actividad portuaria.
- La formación, la promoción de la investigación y el desarrollo tecnológico en materias vinculadas con la economía, gestión, logística e ingeniería portuarias y otras relacionadas con la actividad que se realiza en los puertos, así como el

desarrollo de sistemas de medida y técnicas operacionales en oceanografía y climatología marinas necesarios para el diseño, explotación y gestión de las áreas y las infraestructuras portuarias.

- La planificación, coordinación y control del sistema de señalización marítima español, y el fomento de la formación, la investigación y el desarrollo tecnológico en estas materias.

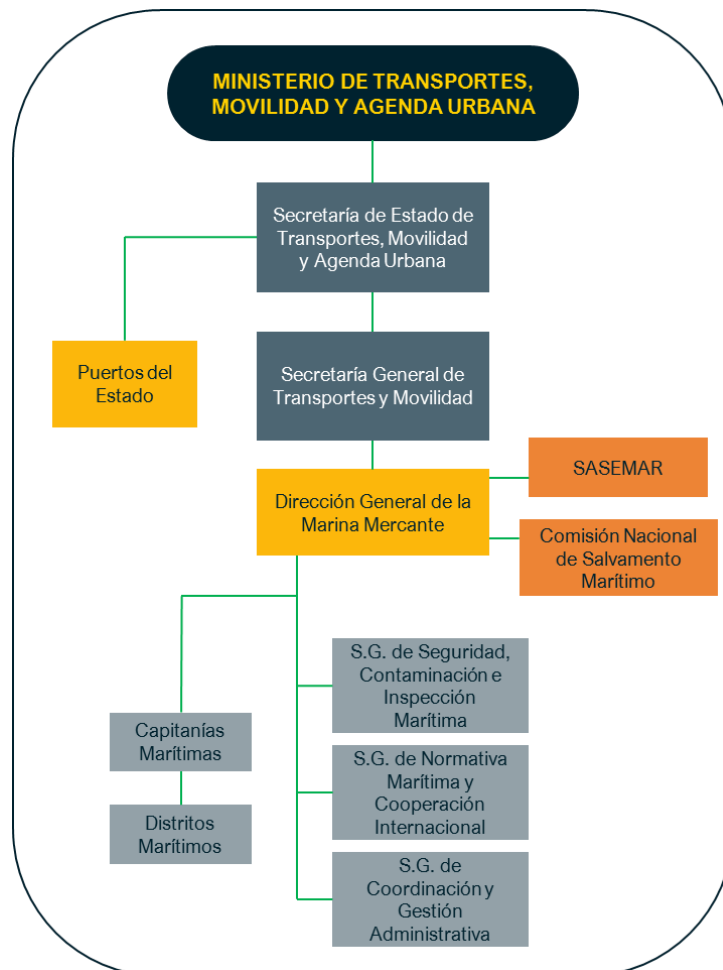


Figura 6. 3. Estructura administrativa del transporte marítimo en España.

Las Comunidades Autónoma, de acuerdo al artículo 148 de la Constitución, pueden asumir ciertas competencias no reservadas de forma exclusiva al Estado. Este texto constitucional hace referencia a la náutica de recreo, la promoción del deporte y la adecuada utilización del ocio.

En la práctica esta facultad se ha traducido en una serie de acuerdos concretos de traspaso de competencias, en cuestiones como autorización de apertura de escuelas de enseñanza náutica, realización y control de los exámenes para el acceso a titulaciones náutico-deportivas, la expedición de los títulos correspondientes, así como la realización y control de los exámenes para el acceso a las titulaciones para el gobierno de las embarcaciones de recreo [205]. Actualmente dichas competencias están transferidas a las Comunidades Autónomas con costa, que son: Andalucía, Cantabria, Cataluña, Ceuta, Comunidad Valenciana, Islas Baleares, Islas Canarias, Melilla, Murcia, Galicia, País Vasco y Principado de Asturias. Cada una de ellas cuenta con su legislación específica.



6.1.4. Estructura del Transporte en España

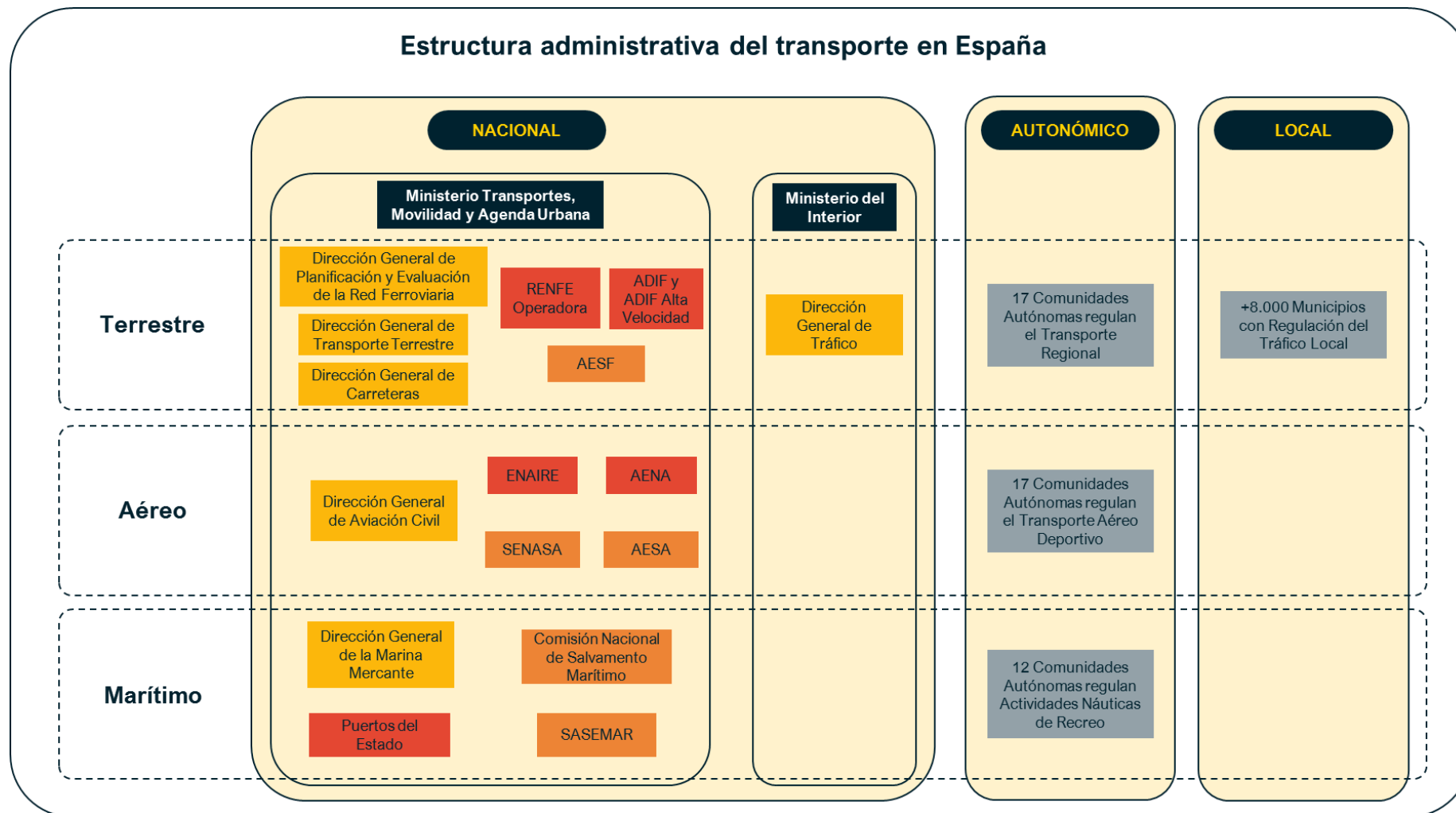


Figura 6. 4. Estructura administrativa del transporte en España.



6.2. Análisis Legislativo para el despliegue e implementación de un Sistema de Transporte Automatizado

La estructura administrativa del transporte en España presenta una organización compleja, como se observa en la Figura 6. 4, formada por diversas administraciones públicas en el ámbito estatal, autonómico y local, que a su vez genera organismos específicos para dividir el ejercicio de sus competencias, y generar legislación para aportar un marco jurídico de referencia.

Automatizar el tráfico implica profundos cambios legislativos que afectan de manera directa a todas estas administraciones y organismos con competencias en el transporte, incluso podrían suponer cambios organizativos respecto a la estructura actual. En este apartado se valoran las acciones legislativas necesarias para la implementación de este sistema de transporte automatizado.

6.2.1. Estudio del proceso legislativo

Las acciones jurídicas necesarias para el despliegue e implementación del sistema de transporte automatizado representan un proceso legislativo complejo, que se puede estructurar en diferentes etapas.

En el apartado 3.3 se analizó la transición hacia el nuevo modelo de movilidad, y se estructuró el proceso en 4 fases principales. Desde el punto de vista jurídico se puede organizar la transición en tres etapas, estrechamente relacionadas con las fases de la transición. Son las siguientes:

1. Etapa de experimentación.
2. Etapa de transición legislativa
3. Etapa de consolidación legislativa

6.2.1.1. Etapa de experimentación

Los inicios de las innovaciones tecnológicas se caracterizan por la irrupción de nuevos productos y dispositivos que no están recogidos en ningún marco legal. Su utilización no está contemplada, tampoco está prohibida, simplemente carece de amparo regulatorio, se podría calificar como alegal. Es lo que ocurrió con la navegación autónoma, en los tres contextos.

Llegados a determinado nivel de desarrollo, fue necesario desarrollar regulaciones específicas para dotar de este marco legal a los vehículos autónomos, de acuerdo a lo analizado en el apartado 2.3. Las normativas citadas se engloban dentro de esta primera etapa de experimentación.

Es una etapa primaria en la que las diferentes administraciones y organismos con competencias directas sobre la regulación del tráfico, como ha sido el caso de la DGT o AESA en España, han elaborado una normativa específica para regular la circulación o pruebas de diferentes vehículos no tripulados o autónomos.



Estas regulaciones se caracterizan por emerger de manera puntual en los diferentes organismos, sin un patrón común en ellas. Su principal misión es favorecer el desarrollo tecnológico, proporcionándole un amparo jurídico y no suponer un impedimento debido a la prohibición o la alegalidad.

En el caso del transporte están amparadas en los marcos estratégicos nacionales e internacionales, cuyo objetivo es la descontaminación ambiental, favoreciendo una movilidad sostenible y climáticamente neutra para que la sociedad gane en prosperidad, seguridad estratégica, generación de empleo, innovación, salud y justicia social. Se abordan cuestiones como la reducción de emisiones, la electrificación del parque móvil, la mejora en la eficiencia y el uso del transporte público en detrimento del transporte privado.

Al tratarse de una primera etapa en proceso legislativo, estas regulaciones se fundamentan, a su vez, en la obtención de datos empíricos a partir de pruebas y test en escenarios reales, con el objetivo de proporcionar a la administración información de calidad, que les ayude a tomar decisiones futuras y planificar las posteriores etapas de transición en relación a las tecnologías de estudio.

Aplicado al caso práctico del sistema de transporte automatizado propuesto en esta tesis, en esta etapa experimental se deben regular los denominados Espacios Experimentales de Navegación (E2n). Presentan diferencias sustanciales respecto a proyectos pilotos y pruebas puntuales que se están realizando en la actualidad. Un Espacio Experimental de Navegación es una propuesta avanzada y estructurada para convertir un área determinada (urbana o rural) en una región de navegación autónoma, bajo los principios del sistema de transporte automatizado. Es decir, un E2n aborda la navegación autónoma de ingenios, con la existencia de una red de comunicaciones dedicada y un sistema de gestión automatizada del tráfico. De esta forma, se genera un demostrador real del sistema presentado.

Estos E2n se pueden regular desde las administraciones locales, regionales o estatales en función de su área de acción. Abordan el marco jurídico para la navegación de ingenios autónomos en diferentes tipos de vías y escenarios reales.

6.2.1.2. Etapa de transición legislativa

Inmediatamente después de la etapa de experimentación, es fundamental afrontar desde el punto de vista legislativo la transición hacia el nuevo modelo de movilidad.

Las pruebas experimentales realizadas habrán proporcionado una gran cantidad de datos de mucho valor, que permitirán abordar y orientar la legislación necesaria para organizar la transición hacia la automatización del tráfico de la mejor manera posible.

A diferencia de la etapa de experimentación, en esta etapa de transición la legislación que se desarrolle debería estar coordinada por la administración del estado, con el objetivo de involucrar a todos los organismos necesarios para potenciar y favorecer el cambio de modelo de movilidad.

La apuesta más lógica sería la elaboración de una ley específica a nivel nacional que sentase las bases fundamentales de la transición. La denominaremos Ley de Transición NERTRA. Debería ser una ley sujeta a modificaciones con el paso de los años, en función



de los desarrollos tecnológicos que se vayan alcanzando, y los datos obtenidos por la entrada en el mercado de los nuevos ingenios.

Algunas de las cuestiones que es imprescindible abordar son:

- Paradigmas del nuevo modelo de movilidad. Esta revolución tecnológica trae consigo profundos cambios sociales que afectarán a nuestro día a día. La legislación de transición debe contemplar estos paradigmas.
- La digitalización de los entornos de navegación. Se necesita definir la estrategia nacional para virtualizar la totalidad de viales por los que se desarrollará la navegación autónoma de ingenios en los tres contextos.
- La expansión de los E2n existentes y generación de nuevos espacios experimentales, que sean considerados estratégicos o de interés nacional para evaluar determinadas circunstancias relevantes.
- La comercialización y entrada en el mercado de los primeros servicios de navegación autónoma. Partiendo de pilotos pre comerciales, que se realicen en los E2n, se deberá regular e incentivar los primeros servicios con ingenios autónomos.
- Despliegue de los Centros de Control de Tráfico. Es necesario definir quién licita el despliegue e instalación de los CCT, así como su mantenimiento o concesión.
- Despliegue de la Red S3. Es necesario definir quién licita el despliegue e instalación de la Red S3, así como su mantenimiento o concesión.
- Estandarización. Es fundamental establecer criterios y protocolos comunes en las diferentes ramas del sistema de transporte automatizado, para posibilitar la integración y operatividad de diferentes entidades y actores.
- Certificación. La movilidad automatizada se caracteriza por incorporar nuevas áreas de conocimiento, que dan lugar a nuevas tecnologías, las cuales necesitan pasar por procedimientos de certificación que verifiquen su seguridad. Adaptar y generar nuevas entidades certificadoras es una tarea necesaria.
- Financiación de infraestructuras. En función de las decisiones tomadas en los dos puntos anteriores, se debe definir los mecanismos de financiación tanto de los CCT como de la Red S3.
- Planificación del despliegue del sistema de transporte automatizado. Hay que definir los plazos establecidos para el despliegue del sistema en el territorio nacional.
- Fiscalidad e ingresos públicos. La comercialización de los servicios del sistema de transporte automatizado genera un nuevo modelo fiscal que repercute de manera directa en los ingresos de las administraciones públicas.
- Estrategia industrial y políticas industriales respecto a las tecnologías que forman parte del sistema de transporte automatizado.
- Definición de políticas de incentivos para estimular a los diferentes agentes, organizaciones y usuarios para la adopción de nuevos servicios e ingenios.
- Planificación del transporte público y la reconversión de las flotas.
- Planificación del transporte de mercancías, centros logísticos y reparto de última milla.
- Planificación de los servicios de transporte bajo demanda.
- Conflictos de intereses. El nuevo modelo de movilidad se presenta como contraposición del modelo convencional y, por tanto, de la industria vinculada. Se deberán generar estrategias de gestión de estos intereses, priorizando siempre el beneficio y el interés general de la sociedad.



En el transcurso de esta etapa se definirán con más detalle todas estas cuestiones fundamentales, y otras que en estos momentos es difícil incluso predecir.

6.2.1.3. Etapa de consolidación legislativa

Se culmina la transición en el momento en el que se ha conseguido automatizar el tráfico del país. Este hito deberá estar acompañado de un marco legislativo que abarque el conjunto de regulaciones y modificaciones organizativas necesarias para posibilitarlo.

La Ley de Transición NERTRA debería dar lugar a una ley que consolide y regula este sistema de transporte automatizado, posibilitando así la automatización del tráfico. Denominaremos esta ley como Ley NERTRA.

Tomando como punto de partida las pruebas experimentales y los datos obtenidos en la primera etapa y sumándole el conjunto de cuestiones analizadas y evaluadas durante el proceso de transición, la Ley NERTRA deberá establecer el marco jurídico de referencia para la navegación autónoma en los medios terrestre, aéreo y marítimo en el territorio español. De la misma manera, definirá la organización estructural del transporte en el país. Debido a la gran cantidad de áreas que abarca una cuestión como el transporte, posiblemente no se pueda abordar en una única ley, sino que será un conjunto de leyes vinculadas.

Es difícil definir con tanto tiempo de antelación unos procedimientos detallados para la realización de este tipo de legislación, donde, además, el conjunto de datos que se obtengan de las pruebas experimentales y la evolución tecnológica de los diferentes elementos tendrán un papel muy destacado. Sin embargo, sí es posible analizar los paradigmas más importantes en los que se fundamentará esta nueva legislación.

6.2.2. Paradigmas legislativos de la automatización del transporte

Los cambios disruptivos tienen dificultades extremas para encontrar acomodo en burocracias, normalmente entrenadas para satisfacer un orden industrial consolidado. El actual modelo de transporte, cuya piedra angular es el vehículo particular, tiene más de cien años de antigüedad, y se ha asentado profundamente en la cultura popular. Esto provoca que se hayan asentado determinadas creencias, vinculadas al transporte que entrarán en conflicto con algunas acciones legislativas venideras.

Habiendo realizado el diseño conceptual de un sistema de transporte automatizado, y un análisis de las acciones legislativas más relevantes para su implementación, con todas las connotaciones que esto representará, se obtiene una reflexión cualitativa sobre los principales paradigmas sobre los que se debe asentar este nuevo marco jurídico. La Nueva Era del Transporte se inspira en cuatro paradigmas principales:

1. La movilidad es un derecho civil.
2. No neutralidad tecnológica.
3. Nube Soberana.
4. Preservar las ciudades como activos cívicos.



6.2.2.1. La movilidad es un derecho civil

La libertad de las personas está estrechamente ligada a libertad de movimiento, y los medios de transporte tienen un papel importante en esta concepción.

La Declaración Universal de los Derechos Humanos, en su artículo 13 determina: “*Toda persona tiene derecho a circular libremente y a elegir su residencia en todo el territorio de un Estado*” [206]. En el artículo 139 de la Constitución Española se establece: “*Ninguna autoridad podrá adoptar medidas que directa o indirectamente obstaculicen la libertad de circulación y establecimiento de las personas y la libre circulación de bienes en todo el territorio español*” [186]. La libre circulación es un principio regulado por las Naciones Unidas y por la gran mayoría de estados del planeta como un derecho fundamental de las personas, recogido en su corpus constitucional.

Sin embargo, en la legislación actual la movilidad está contemplada como un servicio público. Las distintas legislaciones sobre transporte se preocupan de asegurar los derechos de movilidad del conjunto de la población, con especial atención a aquellos que viven en lugares apartados o recónditos.

Antiguamente los desplazamientos se realizaban a pie o a caballo, pero la irrupción de los automóviles permitió reducir notablemente los tiempos de desplazamiento. En la actualidad solo se plantea realizar a pie recorridos de distancias micro o pequeñas. Los desplazamientos de media o larga distancia se realizan siempre por medio de un vehículo, exceptuando las actividades deportivas. En términos prácticos, la libertad de circulación está asociada a la utilización de un vehículo.

El actual modelo de transporte ha experimentado un nivel tal de crecimiento, que ha colapsado de numerosas formas, dando lugar a problemas muy serios (véase apartado 2.1). Los vehículos convencionales no solo han dejado de contribuir a nuestra libre circulación, sino que en muchas ocasiones la impiden. Esta libertad de tránsito o viaje entra en crisis cuando el desplazamiento, incluso en las situaciones más necesarias, como es ir al trabajo o a un hospital, colapsa y se imposibilita. Las situaciones de embotellamiento o congestión impiden la libre circulación.

El problema del tráfico lleva varios años presente en las diferentes sociedades, y se ha aceptado porque no se conocía alternativa. Resulta evidente la necesidad de revertir esta situación, y más cuando el actual patrón de movilidad somete a las poblaciones a elevados grados de estrés, penaliza las interacciones sociales y económicas y se considera un problema global. No obstante, el desarrollo tecnológico reciente permite dar un vuelco a la situación, y soluciones como la presentada en esta tesis, la automatización del tráfico, permitirá garantizar dos cuestiones fundamentales, como son la seguridad y la eficiencia.

Otra cuestión con profundo calado jurídico y un gran impacto en la sociedad se producirá en el momento en el que se haya culminado la transición, y nos encontremos en un escenario con la totalidad del tráfico automatizado. Ello implicará la ausencia de vehículos conducidos en las diferentes vías de circulación. El legislador se enfrentará a la prohibición de la actividad de conducción en las vías públicas, anteponiendo el interés general de la seguridad y la eficiencia, ante cualquier interés particular. La conducción quedará relegada a una práctica deportiva o de ocio, con lugares habilitados específicamente para tal fin.

A este respecto es importante analizar un dato relevante, cuya percepción social generalizada no es del todo correcta. La conducción no es un derecho de las personas. Es



más, se podría considerar que conducir vehículos es una actividad prohibida con carácter general. Para poder conducir vehículos a motor es necesario que las autoridades te concedan un permiso específico, que ha de ser renovado periódicamente. Plantear la conducción como un derecho sería un grave error, porque existen numerosos colectivos que por diferentes circunstancias (edad, condicionantes físicos, salud, etc.) no pueden realizar la conducción de vehículos, y por lo tanto no pueden ejercer tal derecho. La percepción extendida de que tu vehículo te da la libertad de circulación es errónea.

Sin embargo, las características del sistema de transporte automatizado permitirán reinterpretar la movilidad en clave de un derecho civil. Un territorio que haya automatizado el tráfico podrá proporcionar un servicio de movilidad que se caracterice por:

- Universal. Es un servicio universal para todas las edades, desde menores de edad hasta ancianos y personas con discapacidades o problemas de salud.
- Omnidireccional. Se puede garantizar el desplazamiento de cualquier lugar a otro.
- Constante. Existen servicios las 24 horas del día, los 7 días de la semana, los 365 días del año.
- Seguridad. Los ingenios autónomos garantizarán la seguridad de la movilidad autónoma.
- Eficiencia. La gestión automatizada del tráfico garantizará los parámetros de eficiencia que en ningún caso impidan la libre circulación.

Y, en estos términos, sí que se puede extender la movilidad a un derecho fundamental de las personas. En definitiva, se puede lograr que *“cualquier persona pueda desplazarse en cualquier momento a cualquier lugar sin depender de nadie”*.

6.2.2.2. No neutralidad tecnológica

El modelo regulatorio basado en la neutralidad respecto a la ingeniería o las tecnologías que se empleen para una determinada actividad se ha demostrado poco válido para un sector como el transporte.

Los problemas asociados al transporte están en la agenda de los principales planes estratégicos internacionales y nacionales desde hace años. La necesidad imperiosa de resolver los citados problemas del transporte dio lugar a regulaciones que penalizaban el uso de determinadas tecnologías.

El principio de no neutralidad tecnológica en la Nueva Era del Transporte se debe aplicar a tres cuestiones fundamentales: la sostenibilidad, la seguridad y la eficiencia.

Los objetivos de sostenibilidad apuestan y defienden un modelo de movilidad climáticamente neutro, que no suponga un daño para el medioambiente y, por tanto, para la salud de las personas. La penalización se centra en los derivados del petróleo, con el objetivo de eliminar los hidrocarburos como fuente de energía para los ingenios.

La seguridad es un objetivo encomendado a los ingenios, concretamente a sus sistemas autónomos. Los conductores, pilotos o timoneles darán paso a los sistemas autónomos, que embarcan la inteligencia suficiente para garantizar la seguridad, tanto del pasaje como de los elementos externos presentes en el entorno de navegación, durante el ciclo completo del desplazamiento.



La eficiencia es un objetivo asignado a la gestión automatizada del tráfico. Se penaliza el tráfico opaco, en el que cada individuo actúa por sus propios medios, sin cooperar con su entorno. Se favorece la estandarización e integración del conjunto de agentes en el sistema de transporte automatizado, consiguiendo así un tráfico transparente y eficiente.

6.2.2.3. Nube Soberana

La ausencia de un plan estratégico o un proyecto, que diseñe la automatización del tráfico de una nación, puede dar lugar a planteamientos o soluciones anárquicas, o incluso que representen problemas de seguridad nacional.

El transporte es un sector estratégico en cualquier país. La automatización del transporte debe ser considerada y tratada, de igual modo, como una cuestión estratégica de vital importancia.

Vivimos en un mundo de datos, donde existen tremendas guerras por el dominio y control de cuantos más datos mejor. La automatización del tráfico genera ingentes cantidades de datos, vinculados a una actividad estratégica. Las grandes multinacionales de datos aspiran a dominar este gran trasiego de datos asociados a la movilidad, muy superiores a los que se deducen del trasiego entre personas. Es lógico.

Sin embargo, desde el punto de vista de un Estado, en este caso España, el modelo en el que una gran multinacional gestionase, desde cualquier lugar del planeta, los datos del transporte del país y, por tanto, el transporte del país, no resultaría contraproducente. Sería una hipoteca ruinosa. Además de atentar contra el sentido común, va en contra de lo establecido en los ya citados artículos 148 y 149 de la Constitución Española [186], que otorgan al Estado las competencias exclusivas del transporte terrestre, aéreo y marítimo.

El Estado español deberá disponer de su propia nube soberana homogénea, que gestione el transporte en todas sus dimensiones, de la que cuelguen el conjunto de Centros de Control de Tráfico.

Es un modelo que descentraliza la gestión del tráfico por naciones, impidiendo embudos y atascos, y facilitando la interoperabilidad entre nubes soberanas gracias a estándares abiertos y protocolos de seguridad compartidos.

La nube soberana es una cuestión de extrema importancia en la automatización del tráfico. Está en juego mucha inversión, riqueza y trabajo.

6.2.2.4. Preservar la ciudad como activo cívico

Las ciudades alegres, gráciles y bulliciosas de finales del siglo XIX y principios del siglo XX expandían las libertades individuales al inducir, debido a su tamaño, el anonimato y favorecían el éxito personal y social. Estas ciudades han desaparecido. Los intentos de reinención con procesos de gentrificación de algunas partes de la misma, no resuelven sus problemas de fondo. En la actualidad las ciudades son hostiles. Su adversidad está bien documentada, mejor novelada y muy televisada. Demasiado anonimato, no buscado, y muy poco éxito personal y social.



Las ciudades son las responsables de éxodos masivos constantes. Éxodos colosales por su tamaño y persistencia. Por las ciudades pasea la población flotante o turistas, no los naturales de la ciudad. Los naturales abandonan la ciudad en cuanto pueden. Cada fin de semana, cada puente, en las vacaciones, la gente huye de las ciudades sin contemplaciones.

El bullicio ha sido sustituido por el embotellamiento, el anonimato por la soledad y la gracilidad por el aire sucio, el ruido ensordecedor, la falta de tiempo y la frustración de los habitantes. Las ciudades no son alegres, son agobiantes. ¿Qué ha pasado? En esencia un mal modelo de crecimiento y en la práctica, una estructura de movilidad que se ha desbordado por todas partes. Las ciudades llevan más de un siglo poniéndose al servicio de los distintos sistemas de transporte, comenzando por el coche de caballos, y continuando por el coche de combustión. Su planificación ahora mismo la dicta la oferta de la industria automotriz.

¿Nos movemos dentro de la ciudad como fuera nuestro deseo? Definitivamente no. La gente se mueve lo imprescindible porque resulta complicado y en muchas ocasiones extenuante.

Un sistema de transporte automatizado permite remediar esta cuestión, transformando la movilidad en una actividad amable para el ciudadano. Y esto se traducirá en un incremento en la movilidad actual y poder alcanzar el anhelado objetivo de movernos tanto como queremos.

La seguridad de la automatización del tráfico la disfrutarán tanto los viajeros como los peatones que habiten las calles de las ciudades. La eficiencia alcanzada se traducirá en una liberación enorme de espacios en las ciudades que, en la actualidad, se utilizan para dejar los vehículos. En paralelo a esta transición hacia la movilidad automatizada se cambiará la planificación urbanística, dando lugar a la recuperación de las ciudades para las personas.



7. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA MOVILIDAD EN UNA CIUDAD DE REFERENCIA

Estudiar el impacto que tendrá el sistema de transporte automatizado en la movilidad es otro de los objetivos principales de esta tesis doctoral. Una vez se ha presentado el diseño conceptual para automatizar el tráfico y se han analizado la estructura administrativa y las implicaciones legislativas necesarias para su implantación, el siguiente paso es valorar la influencia que tendrá la automatización del tráfico en la movilidad de personas y mercancías. Los resultados que se obtengan servirán de referencia para realizar el posterior estudio del impacto de la automatización del tráfico en la economía a nivel nacional.

En este capítulo se analiza la evolución de la movilidad con el despliegue de un sistema de transporte automatizado. Uno de los principales problemas en la realización de estudios de movilidad es la ausencia de datos fiables, que reflejen el comportamiento real y las tendencias que siguen las personas en su día a día. A pesar de que existen estudios en profundidad sobre la movilidad en determinados núcleos urbanos que aportan datos fiables, a nivel nacional no existe ningún estudio de referencia. La metodología seguida en este análisis consiste en el análisis de la movilidad en uno de estos núcleos urbanos en los que existen datos reales, y su posterior utilización como punto de partida para realizar una simulación de movilidad mediante una herramienta que permita la recreación de un escenario con el sistema de transporte automatizado. Los resultados obtenidos permitirán comprender el impacto que tendrá el diseño conceptual presentado, una vez se haya implementado en escenarios reales. También servirán de referencia para la posterior realización de estudios a escala nacional, que permitan obtener una visión macro de la movilidad en el país.

7.1. Características de la ciudad de León que determinan los patrones actuales de movilidad

La elección de la ciudad de León como referencia para realizar el estudio del impacto real en la movilidad de la implementación del sistema de transporte automatizado está fundamentada en varias razones. El desarrollo de esta tesis doctoral en la Universidad de León tiene importancia. Las características de la ciudad, de tamaño medio, es representativa de los principales patrones de movilidad a lo largo del territorio nacional, alejado de las particularidades de las grandes áreas metropolitanas que presentan otros patrones específicos en sus sistemas de transporte. Y ha sido decisivo la existencia de un estudio detallado de movilidad en la ciudad, el Plan Integral de Movilidad Sostenible para la ciudad de León, publicado en el año 2009 [207].

Existen diversos indicadores clave que determinan el comportamiento de los ciudadanos y, por lo tanto, de su movilidad dentro de una ciudad. Destacan los indicadores poblacionales, económicos y los del parque móvil.



7.1.1. Indicadores poblacionales

El primer indicador es la configuración urbana de la ciudad, la distribución de sus áreas y barrios, así como los municipios cercanos con elevado grado de interacción con la capital. En función de esta estructura de ciudad se componen las calles y carreteras por las que circulan los vehículos.

La población es otro de los factores más importantes, siendo los habitantes y sus costumbres los que establecen la demanda de movilidad necesaria. El área metropolitana de León se compone por un total de 11 municipios. El mencionado plan de movilidad de León se realizó con datos del año 2007. Para este análisis se ha considerado la evolución de la población en esta área metropolitana desde esa fecha hasta la actualidad, en base a los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE). La Tabla 7. 1 recoge los datos de población del área metropolitana de León.

Tabla 7. 1. Evolución de la población del área metropolitana de León [208].

Población Área Metropolitana de León				
Municipio	2007		2020	
León	135.059	67,4%	124.028	62,6%
San Andrés del Rabanedo	28.894	14,4%	30.549	15,4%
Villaquilambre	15.068	7,5%	18.684	9,4%
Valverde de la Virgen	5.787	2,9%	7.377	3,7%
Sarriegos	3.880	1,9%	5.084	2,6%
Chozas de Abajo	2.273	1,1%	2.561	1,3%
Valdefresno	2.001	1,0%	2.173	1,1%
Santovenia de la Valdoncina	1.899	0,9%	2.100	1,1%
Cuadros	1.878	0,9%	2.035	1,0%
Villaturiel	1.884	0,9%	1.826	0,9%
Onzonilla	1.622	0,8%	1.832	0,9%
Población Total	200.245	100%	198.249	100%

Como se observa en la tabla anterior, la población global del área metropolitana se ha reducido en aproximadamente dos mil personas. En el caso del municipio de León, la reducción es mayor debido a un fenómeno de descentralización de las viviendas a favor de los municipios de la periferia. En la actualidad concentra el 62,6% de la población del área metropolitana.

Los factores socioeconómicos, territoriales y urbanísticos tienen una gran influencia en la definición de los patrones de movilidad. Hay que identificar las fuentes de generación y atracción de viajes.

Un indicador son las singularidades poblacionales, como es la distribución de población según edades o particularidades, así como la distribución y características de las viviendas, que se pueden considerar como el origen y destino final de los viajes y desplazamientos que se realizan a lo largo de un día.



Tabla 7. 2. Indicadores poblacionales ciudad de León [207].

Fuentes de Generación y Atracción de Viajes - Indicadores poblacionales	
Población 15-64 años	66,8%
Personas de movilidad reducida y discapacitados	7,9%
Viviendas Familiares	66.362
Viviendas Familiares Principales	72,2%
Viviendas Familiares No-Principales	27,8%
Viviendas Familiares Secundarias (Respecto No-Principales)	8,0%
Viviendas Familiares Vacías (Respecto No-Principales)	16,3%
Tamaño medio Familiar	2,5

Los principales indicadores poblacionales que recoge el plan de movilidad de la ciudad de León y se han empleado en este análisis se recogen en la Tabla 7. 2. La población activa, o población en edad de trabajar, es el principal demandante de viajes. A su vez, el grupo de personas con movilidad reducida o algún tipo de discapacidad tiene importancia debido a las necesidades especiales de movilidad que tienen. En relación a las viviendas, no es necesario identificarlas, sino también saber su grado de ocupación. Destaca que el 72,2% de las viviendas son viviendas familiares principales. La organización familiar también tiene su influencia, ya que determina las necesidades de vehículos que se tiene en cada núcleo familiar. El mencionado plan de movilidad estableció el tamaño medio familiar en 2,5 personas por hogar.

7.1.2. Indicadores económicos

La economía en el área metropolitana de León se ha mantenido estable en relación al tipo de actividad económica en los últimos años. Se ha experimentado un aumento en el índice de actividad económica en los municipios limítrofes con León. En la Tabla 7. 3 se recogen los principales indicadores económicos. Se aprecia la clara dedicación de la población a las actividades terciarias. Esta distribución sectorial tiene bastante influencia en el tipo de desplazamientos que se realizan.

Tabla 7. 3. Indicadores económicos de la ciudad de León [207].

Fuentes de Generación y Atracción de Viajes - Indicadores Económicos	
Tasa de actividad	1,4%
Tasa de paro	8,0%
Empleos totales	69.672
Empleos Agricultura	0,9%
Empleos Industria	6,5%
Empleos Construcción	9,2%
Empleos Servicios	83,4%

En el plan integral de movilidad de la ciudad de León [207], se realiza un estudio detallado en el que se identifican los centros de atracción de viajes, agrupados en establecimientos comerciales, establecimientos comerciales al por mayor y al por menos, establecimientos



de vehículos y combustibles, gasolineras, hipermercados, grandes almacenes, almacenes populares, establecimientos hoteleros, hostelería, cines, farmacias, centros educativos, centros de salud, centros hospitalarios y su capacidad, ambulatorios, locales activos, otros establecimientos educativos, establecimientos de bienestar social, establecimientos culturales o deportivos, locales comerciales, locales industriales, oficinas y locales agrarios. Estos centros de atracción y generación de desplazamientos se cuantifican por grupos, y se realiza una distribución por áreas de la ciudad.

7.1.3. Indicadores del parque móvil

La configuración y distribución del parque móvil es el siguiente indicador de peso en este análisis. En definitiva, son los instrumentos disponibles para dar el servicio de movilidad a la población con el sistema convencional de transporte.

Tabla 7. 4. Indicadores del parque móvil de la ciudad de León [207].

Parque móvil de vehículos y motorización	
Turismos	61.346
Motocicletas	6.981
Camiones	6.630
Autobuses	285
Tractores y otros	2.243
Parque móvil total	77.485
Índice de Motorización (vehículos/100 hab.)	550
Hogares con coche	75,70%
Hogares con bicicleta	49,90%
Hogares con Motocicleta	12,70%
Hogares con furgoneta	4,40%

Los datos de la Tabla 7. 4 se corresponden con el parque móvil del año del estudio, 2007, del municipio de León. No obstante, se ha considerado necesario ampliar la perspectiva de este plan en el análisis de movilidad realizado. En la Tabla 7. 5 se presenta la evolución del parque móvil por tipo de vehículos en la provincia de León desde la fecha de realización del plan de movilidad hasta los últimos datos publicados por la DGT.

Tabla 7. 5. Evolución del parque móvil provincia de León [209].

Parque móvil de vehículos León			
Tipo	2007	2019	Tasa Crecimiento
Turismos	239.340	262.337	9,61%
Motocicletas	16.495	27.656	67,66%
Camiones y furgonetas	57.714	58.617	1,56%
Autobuses	707	672	-4,95%
Tractores	3.211	2.945	-8,28%
Otros	11.168	12.665	13,40%
Total	328.635	364.892	11,03%



Actualmente el parque móvil está compuesto principalmente por vehículos privados, destacando la gran mayoría de turismos, que representan el 71,9% del total. Las tasas de crecimiento también aportan datos relevantes, y se confirma esta tendencia en la que los vehículos privados son los que más han crecido últimamente, destacando las motocicletas, con un crecimiento del 67,66%.

7.2. Radiografía de la movilidad actual en la ciudad de León

Habiendo analizado las características de la ciudad y los principales indicadores y fuentes de atracción y generación de viajes, se valoran los resultados que permiten obtener una radiografía de la movilidad actual en la ciudad de León. Estos datos sirven de referencia para comparar el impacto que tendrá la implementación de un sistema de transporte automatizado en el mismo escenario.

Las conclusiones del plan de movilidad el Ayuntamiento de León permiten realizar una evaluación del sistema de transporte de la ciudad. Los indicadores genéricos obtenidos se presentan en la Tabla 7. 6.

Tabla 7. 6. Indicadores de la movilidad actual en la ciudad de León [207].

Indicadores de Movilidad	
Viajes diarios	343.082
Viajes/habitante/día	2,7
Viajes motorizados diarios	1,03
Etapas/viaje	1,07
Tiempo medio de viaje (minutos)	17,1
Tiempo diario destinado al transporte/desplazamiento (min)	46,17
Viajes en transporte público	5,60%
Viajes en vehículo privado	29,48%
Viajes a pie	64,36%
Viajes en bicicleta	0,28%
Viajes en taxi	0,27%
Reparto modal transporte publico	16,00%
Reparto modal transporte privado	84,00%
Viajes por trabajo y gestiones	27,84%
Viajes por estudios	10,22%
Viajes por compras	19,83%
Viajes por otros motivos (médico, ocio, visitas, etc.)	42,11%

Se obtuvo que un ciudadano leones en un día laborable normal realiza una media de 2,7 viajes, de los cuales 1,03 son viajes motorizados. El dato de las etapas de viaje hace referencia a la secuenciación de dichos viajes en diferentes etapas, es decir, cada uno de los trayectos en los que se descompone cada viaje. El dato de 1,07 implica que en la gran mayoría de casos no se produce un cambio de modo en los viajes realizados.



El tiempo medio de cada viaje es de 17,10 minutos, resultando en un tiempo diario destinado al desplazamiento de 46,17 minutos. Es un dato ligeramente inferior a la media nacional.

En cuanto al tipo de desplazamiento, el predominante son los desplazamientos a pie, que representan el 64,36% del total. El siguiente tipo más frecuente son los desplazamientos en vehículo privado, suponiendo un 29,48%.

Se observan dos datos que son realmente significativos, y el fiel reflejo de una de las principales características del sistema de transporte actual, que es la distribución entre el transporte público y privado. El 84% de los desplazamientos se realizan en vehículos privados, mientras que únicamente el 16% se realizan en transporte público.

Tabla 7. 7. Distribución de viajes según el modo de transporte utilizado en la movilidad actual de León [207].

Distribución de viajes según el modo de transporte utilizado		
A pie	220.801	64,36%
Bicicleta	976	0,28%
Autobús Urbano	18.289	5,33%
Autobús interurbano	865	0,25%
RENFE	44	0,01%
FEVE	31	0,01%
Autobús empresa/escolar	2.032	0,59%
Taxi	910	0,27%
Coche Conductor	75.703	22,07%
Coche Acompañante	20.399	5,95%
Moto Conductor	1.138	0,33%
Moto Acompañante	116	0,03%
Furgoneta/Camión	85	0,02%
Otros (avión, tractor, etc.)	1.693	0,49%
Total	343.082	100%

La Tabla 7. 7 amplía los resultados obtenidos en cuanto a la distribución modal de los desplazamientos realizados por el conjunto de población de la ciudad. Se aprecia como el conjunto de los medios de transporte público son de uso residual, a excepción del autobús urbano, que llega al 5,33%. La estructura del transporte público convencional, organizada en pocas líneas con frecuencias muy bajas, explica la baja utilización de este tipo de sistemas. La oferta de transporte público está muy alejada de las demandas reales de movilidad de la población.

Tabla 7. 8. Indicadores de la movilidad actual en transporte privado en León [207].

Indicadores de transporte en vehículo privado	
Viajes diarios en vehículo privado	101.166
Ocupación media (Pasajero/Vehículo)	1,26
Recorrido medio (km/viaje)	3,18
Tiempo medio de viaje en vehículo privado (min)	16,42
Velocidad media de circulación (km/h)	11,62



En la Tabla 7. 8 se recogen los indicadores más relevantes del transporte privado en la ciudad. Un dato revelador es la tasa media de ocupación, de 1,26 personas por vehículo, teniendo en cuenta que la mayoría de turismos tienen capacidad para 5 pasajeros, es decir, que es aproximadamente del 25 % de la capacidad en cada desplazamiento. En un escenario donde la congestión supone un grave problema, y el consumo energético está estrechamente relacionado con la contaminación ambiental, este dato refleja la nula eficiencia del modelo de transporte, que podría calificarse como anticuado. El dato presentado del recorrido medio por viaje hay que tomarlo con mucho cuidado, porque es representativo únicamente dentro del municipio de León. La distancia de 3,18 km recorridos en cada viaje en vehículo privado no representa un escenario real. El tiempo de 16,42 min en cada viaje está estrechamente ligado al anterior dato, y ha de considerarse de la misma manera. Es conveniente comparar este dato con otro estudio realizado sobre el recorrido medio que realiza cada habitante en España, estimado en 41,6 km [210]. En términos generales aporta una mejor estimación de los desplazamientos reales de los ciudadanos. Estas consideraciones serán tenidas en cuenta posteriormente para realizar los modelos y simulaciones de movilidad.

No obstante, un dato que sí es altamente representativo es la velocidad media de circulación, de 11,62 km/h. Puede llegar a sorprender, pero hay que tener en cuenta que en una organización del tráfico por lotes (ver apartado 9.4) durante buena parte de los trayectos los vehículos se encuentran detenidos en intersecciones. Se plantea entonces el debate o la cuestión de cuál debería ser la velocidad de circulación óptima en una zona urbana. Recientemente se han aprobado numerosas medidas y regulaciones para reducir la velocidad máxima en los núcleos urbanos de 50 km/h a 30 km/h, sostenidas bajo el argumento de incrementar la seguridad y reducir la mortalidad en los accidentes que se producen, pero planteando serias cuestiones en cuanto a la reducción de la eficiencia del tráfico debido a la ralentización del mismo. Desde el punto de vista de la eficiencia, el límite máximo de velocidad no es la cuestión importante, sino incrementar la velocidad media del trayecto. Si se consiguiese alcanzar una velocidad media de 20 km/h, estaríamos hablando de reducir a la mitad prácticamente el tiempo que dedicaríamos a cada viaje en el núcleo urbano.

7.3. Análisis del impacto del Sistema de Transporte Automatizado en la movilidad de la ciudad de León

En los dos apartados anteriores se ha obtenido una visión de la morfología de la ciudad de estudio y los principales factores e indicadores que determinan los patrones de movilidad, y se han presentado los datos más relevantes del actual modelo de movilidad. En este apartado se analiza el impacto del despliegue del sistema de transporte automatizado en esta misma ciudad de estudio, León, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los actuales.

El planteamiento de este análisis es sencillo, evaluar el impacto del modelo conceptual de sistema de transporte automatizado presentado en base a los criterios de eficiencia. Tomando esta premisa central de la eficiencia, la pregunta a resolver sería la siguiente: ¿Cuál es la flota de ingenios que se necesita para resolver la movilidad en una ciudad como León?

7.3.1. Herramienta de simulación

El problema a resolver es la optimización de la flota de ingenios necesaria para satisfacer la demanda de movilidad de una ciudad. La metodología empleada consiste en la utilización de una herramienta de simulación que permita establecer las características de la movilidad en la ciudad, y recrear el comportamiento de los ingenios bajo los diferentes criterios que se utilicen en el proceso.

La herramienta empleada es la aplicación CGN (Centro de Gobierno NERTRA), que pertenece a la empresa DROTIUM, y que se ha puesto a disposición de esta tesis doctoral permitiendo publicar los resultados obtenidos. La herramienta CGN no es de dominio público y por lo tanto no se pueden publicar los detalles del software empleado. No obstante, la empresa publicó las bases del funcionamiento del algoritmo del simulador y se puede consultar [211].

El proceso de simulación comenzó con la introducción de la red viaria del área metropolitana de León en la herramienta CGN, tal y como se observa en la Figura 7. 1.

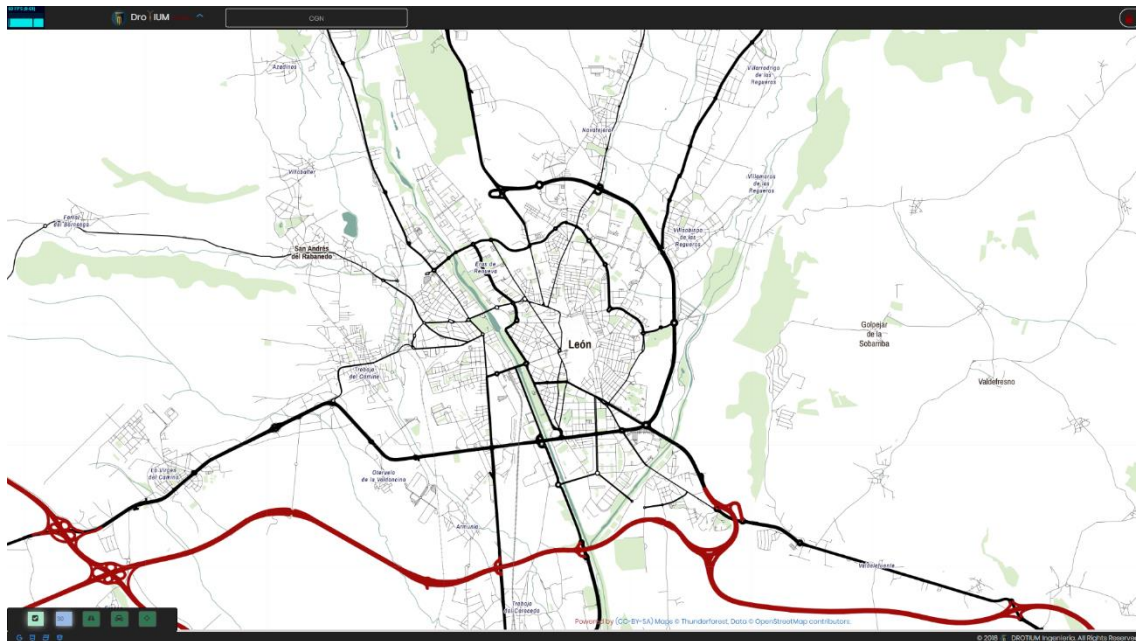


Figura 7. 1. Red viaria del Área Metropolitana de León en la herramienta CGN.

La simulación consiste en la generación de viajes, que representan los desplazamientos de la ciudadanía. Estos viajes se definen mediante un origen y un destino, sin posibilidad de elección de criterios de rutas para simplificar el proceso. Cada nuevo viaje se identifica como una nueva solicitud, que tiene asignado un periodo temporal vinculado al inicio del trayecto. Es decir, que cada solicitud tiene las coordenadas del origen y un tiempo asociado, y las coordenadas del destino.

El siguiente paso consiste en organizar la distribución de estas solicitudes. Para ello se han empleado los datos analizados en el apartado 7.1. Se realizó una distribución de la ciudad en sectores, y se distribuyeron los centros de atracción y generación de viajes. De esta forma la generación de estas solicitudes no sigue criterios basados en la aleatoriedad, sino

que se fundamentan en los patrones de movilidad de la población obtenidos principalmente del citado plan integral de movilidad de León [207].



Figura 7. 2. Sectorización e identificación de los centros de atracción y generación de viajes en la herramienta CGN.

Concluido este proceso de sectorización del área metropolitana (véase Figura 7. 2), se han obtenido las condiciones básicas que permiten el posterior desarrollo de la simulación.

7.3.2. Criterios de diseño de la simulación

La optimización es un proceso que se debe adaptar a una serie de parámetros o criterios que se busquen maximizar o minimizar. El punto neurálgico es alcanzar la máxima eficiencia del sistema, empleando el criterio de utilización de la flota mínima.

La premisa inicial sobre la que se ejecuta la simulación es el diseño de una flota de ingenios para satisfacer al completo la demanda de movilidad de la ciudad. No existen alternativas de movilidad y se debe proporcionar una nueva que englobe los desplazamientos del conjunto de la ciudadanía de León. Cada ciudadano se considera un usuario del sistema de transporte automatizado, y ejecutado el proceso de optimización de rutas ante cada solicitud, se le asigna una ruta y un ingenio.

En relación a la flota de ingenios utilizada, es necesario definir una serie de parámetros característicos de la misma. Es decir, definir los tipos y características de los ingenios, principalmente los relacionados con la capacidad de transporte. Se han definido las siguientes categorías de ingenios:

- Grupo A. Ingenios de 4-6 plazas. Este grupo está pensado para aquellos ingenios de prestaciones similares a los actuales turismos.
- Grupo B. Ingenios de 8-12 plazas. Es una categoría de ingenios que tiene especial relevancia en los servicios de movilidad urbana.



- Grupo C. Ingenios de 14-18 plazas. Son aquellos ingenios pensados para transportar a grandes grupos de personas en actividades concretas.
- Grupo D. Otros ingenios. Es la categoría que engloba el conjunto de ingenios con particulares, desde ingenios de transporte individual, ingenios adaptados a personas con movilidad reducida o ambulancias, entre otros.

Definidas estas características generales de la flota de referencia, uno de los objetivos de la simulación, sino el principal, es cuantificar el número de ingenios necesarios en cada una de las categorías.

Además de la flota de referencia, es necesario establecer una serie de parámetros que gobiernen el comportamiento de la simulación. Estos parámetros son:

- Todos los usuarios tendrán un asiento propio durante todo el trayecto. Tanto por razones de seguridad como de confort, los pasajeros irán siempre sentados. Esto significa que en ningún momento se podrá exceder la capacidad máxima de asientos que tenga cada ingenio en cuestión.
- A 2 minutos del origen y el destino. La herramienta realiza un proceso de agrupación de solicitudes cercanas, por ejemplo, si aparecen dos solicitudes simultáneas con una diferencia de 50 metros, el ingenio que recoja a los usuarios realizará una única parada intermedia, en lugar de 2. Por lo tanto, es necesario establecer un criterio máximo para esta cuestión. Se ha empleado el criterio de que no ningún usuario tarde más de 2 minutos desde su origen hasta el punto de recogida, ni más de 2 minutos desde el punto de bajada del ingenio hasta su destino final.
- Incremento máximo del 20%. La utilización de un sistema de transporte bajo demanda colectivo implica que haya una serie de penalizaciones en las rutas, en comparación a la ruta individual de cada usuario. Se utiliza el criterio de que cada ruta asignada no suponga un incremento en el tiempo ideal de la ruta más corta superior al 20%.
- Una sola etapa por viaje. En esta simulación se ha considerado que cada viajero utiliza un único ingenio para llegar desde su origen al destino, es decir, un viaje monoetapa.

Utilizando estos criterios principales de referencia, se procedió a realizar las simulaciones pertinentes.

7.3.3. Resultados obtenidos

El proceso de simulación ha requerido de varias iteraciones para alcanzar la solución óptima. En cada una de estas iteraciones se realizaron ajustes para adaptar los diferentes parámetros y corregir errores.

El periodo de ejecución de la simulación han sido 24 horas, el equivalente a un día laboral genérico. La demanda de movilidad varía mucho en función de la franja horaria en la que nos encontremos. El punto crítico en el proceso de optimización es la hora punta, aquel o aquellos momentos en los que de manera simultánea se mueve un mayor número de personas. Por lo tanto, el dimensionamiento de la flota mínima se realiza en base a la demanda en hora punta. En la Figura 7. 3 se muestra una de las fases de ejecución de la simulación, donde cada punto representa a un ingenio en circulación.

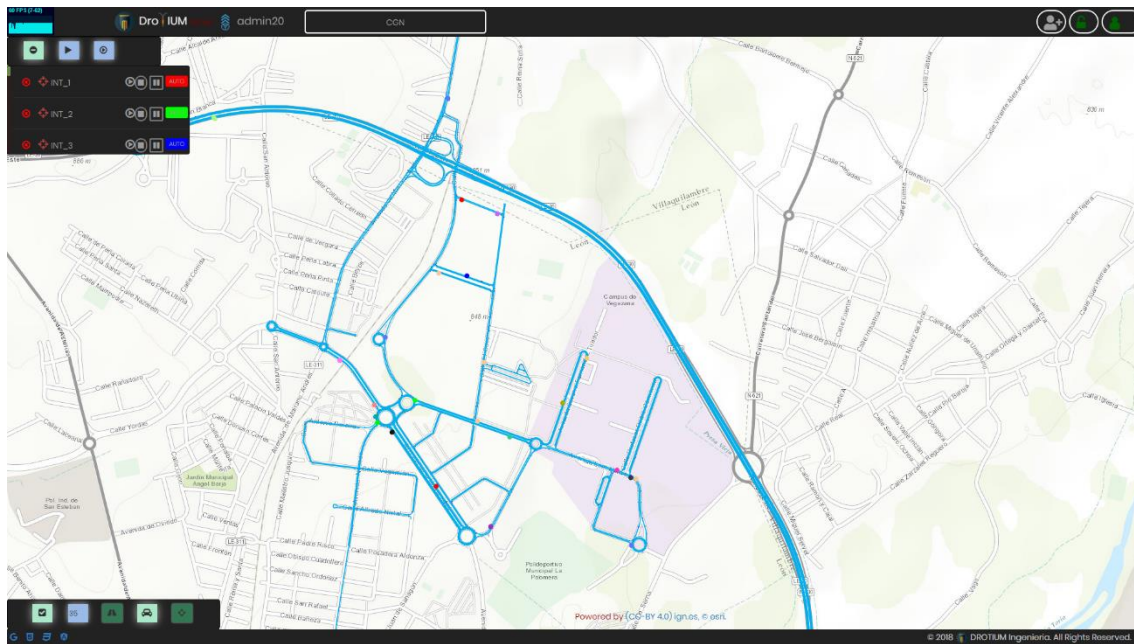


Figura 7. 3. Simulación parcial de flujos de tráfico en la herramienta CGN.

Uno de los resultados obtenidos en las simulaciones, que es bastante evidente por otra parte, es que más del 90 % de los desplazamientos de personas se realizan en la franja horaria comprendida entre las 6:30 h y las 23:30 h. Esto permite cuantificar un tiempo operativo de unas 17 horas, dato muy relevante desde el punto de vista de la gestión de flotas, e incluso desde el punto de vista de diseño del ingenio, teniendo en cuenta que en un modelo de electromovilidad la autonomía y la recarga energética tienen un papel muy destacado.

Tabla 7. 9. Resultado de la optimización de la flota de ingenios en la ciudad de León.

Optimización de la flota de ingenios en la ciudad de León	
Ingenios	Cantidad
Grupo A	770
Grupo B	2.888
Grupo C	128
Grupo D	800
Total	4.586

El resultado final de la simulación, que determina la flota mínima de ingenios en la situación ideal para satisfacer la demanda de movilidad de la ciudad de León, se presenta en la Tabla 7. 9. Una flota de 4.586 ingenios con el sistema de transporte automatizado, en una situación ideal, sería capaz de satisfacer la demanda de movilidad de una ciudad como León. Comparando esta flota con el parque móvil existente cuando se realizó el estudio que publicó los datos empleados en esta simulación, se experimenta una tasa de reducción del 94% del parque móvil. Es un dato sorprendente, pero fácilmente explicable. La simulación busca optimizar los flujos de tráfico, así como maximizar la ocupación media de cada ingenio. En la actualidad el 84% de los viajes se realizan en vehículos privados, y el tiempo medio de viaje en vehículos privado es de 16,42 min. Esto implica que más de 23 horas



diarias de media los vehículos están estacionados, sin funcionar. Es decir, el 98,86% del tiempo útil de cada día los vehículos se encuentran aparcados. Además, durante su funcionamiento la tasa de ocupación media actual es muy baja, del 25,2%. Son datos reveladores, que permiten darse cuenta del sobredimensionamiento real que existe en cuanto al número de vehículos actuales y la total ineficiencia del sistema de transporte. La tasa de ocupación media general por ingenio obtenida en la simulación es del 61,67%. Supone un incremento muy notable, pero aún se podría mejorar mediante la optimización de los algoritmos empleados y los datos reales que se obtengan una vez se haya implementado el sistema en escenarios reales.

Otro dato relevante obtenido es el de la velocidad media de recorrido genérica para el conjunto de categorías de ingenios, resultando en 19,7 km/h. La simulación se ha realizado bajo unas reglas de tráfico que permiten el tráfico de flujos, dando un salto cualitativo en la fluidez del tráfico, y, por tanto, en la eficiencia. Destaca también el grupo mayoritario de ingenios, correspondientes al grupo B, ingenios de entre 8 y 12 plazas, representan el 62,97% de la flota. Se presentan como el tipo de ingenios con mejores características para sistemas de movilidad colectiva en núcleos urbanos. Estos datos coinciden con el de otras investigaciones similares, que cuantifican la reducción del parque móvil superior al 85% utilizando vehículos de 10 plazas [121], o estiman que los servicios de movilidad colectiva podrán representar un 95% de los kilómetros totales recorridos [122].

Es importante darse cuenta del marco en el que se ha realizado la simulación, diseñada en un escenario ideal. Se ha obtenido la flota mínima teórica para resolver la movilidad de la ciudad de León. Sin embargo, incluso en el momento en el que se haya completado la transición, será complejo alcanzar la situación ideal por numerosos factores. A pesar de la clara evolución hacia los sistemas de movilidad colectiva, seguirán existiendo ingenios particulares, aunque posiblemente tendrán un segundo uso cuando su propietario no lo esté utilizando, porque le podrá suponer una fuente alternativa de ingresos al alquilar sus servicios a terceras personas. En cualquier caso, esto representará una penalización respecto a la situación ideal. El transporte de mercancías no se ha analizado en esta simulación, lo cual significa que serán necesarios más ingenios. El crecimiento notable en el comercio online está creando una clara tendencia que incrementa la demanda de movilidad de mercancías, traduciéndose en la necesidad de más ingenios. Existen además una serie de eventos o circunstancias especiales de movilidad que pueden requerir servicios particulares.

Siguiendo con los resultados obtenidos, el siguiente paso es realizar una extrapolación de los mismos al ámbito nacional. En el siguiente capítulo se analiza este proceso, valorando el impacto que tendrá el sistema de transporte automatizado en la economía nacional.



8. ESTUDIO DEL IMPACTO ECONÓMICO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE AUTOMATIZADO EN LA ECONOMÍA DE ESPAÑA

El principal motivo que impulsó los diferentes procesos de automatización ha sido la importantísima mejora que tienen en la productividad. La automatización del tráfico elevará los niveles de eficiencia a una nueva escala, tal y como se ha presentado, y su impacto económico será muy importante. Pero el sistema de transporte automatizado no afectará a la economía únicamente desde la perspectiva de la eficiencia, o productividad, sino también desde el conjunto de problemas que resuelve, como pueden ser los accidentes o la contaminación, cuyas consecuencias negativas afectan sobremanera a la economía.

Se ha realizado un estudio sobre el impacto del sistema automatizado de transporte en la economía de España, enmarcado dentro del desarrollo de esta tesis doctoral, y publicado bajo el título “*Economic Impact of Autonomous Vehicles in Spain*”. En este capítulo se comentan las partes más relevantes y los resultados obtenidos en el citado estudio [212].

8.1. Metodología

El objetivo principal de ese estudio fue determinar cómo evolucionaría el transporte en España con la implementación de un sistema de transporte automatizado, que diera lugar a un nuevo parque móvil compuesto por ingenios eléctricos y autónomos.

Con tal fin, se analizaron figuras macroeconómicas, utilizando recolecciones de datos de diferentes subsectores del transporte, permitiendo establecer un mapa del estado del sector. En especial, se empleó el Producto Interior Bruto (PIB) como indicador principal del estudio, debido a que permite mostrar el valor de mercado de diferentes sectores en periodos específicos de tiempo. El estudio se apoyó en datos disponibles de diferentes entidades y organizaciones. Se realizaron previsiones en los diferentes subsectores que muestran la evolución de cada uno, en función de la irrupción de la nueva movilidad.

Primero se identificaron los sectores e industrias más afectadas por este cambio de paradigma en el transporte y se proporcionaron series de datos relativos a cada uno de ellos. Seguidamente se utilizaron fuentes para la recolección de datos, que proporcionan indicadores clave en el análisis de la situación actual de las industrias relativas al transporte. Se consideró la fase de transición que tendrá lugar, donde los vehículos autónomos irán apareciendo y creciendo en el mercado, en una etapa de convivencia con los vehículos convencionales, y se realizó una estimación de la evolución de cada industria. Esta entrada en el mercado no será lineal, sino que seguirá una curva exponencial. En las primeras etapas, la movilidad autónoma tendrá una reducida cuota de mercado, mientras que las últimas etapas experimentarán un crecimiento enorme.

De acuerdo con estas previsiones, se seleccionaron tres escenarios de la transición para realizar el estudio. El primero con una cuota de mercado de movilidad autónoma del 20%,

el segundo con un 50 % y el tercero con el 100 %, es decir, cuando finaliza la transición, consideradas como las más representativas.

En el análisis de las series temporales se evaluaron algunos indicadores clave, que demuestran cómo evolucionará cada sector, en contraposición con la tendencia que seguirían con el modelo actual. Se realizaron estimaciones de las variaciones que experimentarán estos indicadores en los diferentes escenarios de estudio. Se utilizó el modelo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) para el tratamiento de estos datos temporales y la realización de las previsiones. La metodología se amplía en mayor detalle en el propio artículo [212].

8.2. Resultados obtenidos

Los resultados derivados de la realización de este estudio se agrupan en las previsiones de carácter general y el análisis en detalle de los diferentes sectores afectados.

8.2.1. Previsiones generales

Primeramente, en el estudio se analizaron diversas variables consideradas como los indicadores más representativos de la evolución del sector del transporte. Tomando como referencia los resultados de las tendencias que seguían estos indicadores generales, se realizaron las estimaciones de la evolución de parámetros críticos del transporte, como la evolución del parque móvil, y de las principales figuras macroeconómicas.

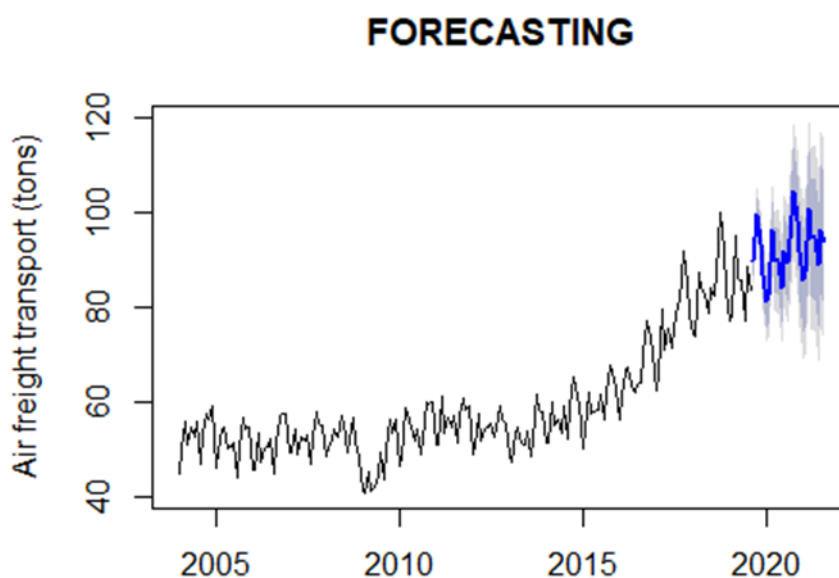


Figura 8. 1. Evolución del movimiento de mercancías (en toneladas) transportadas por aire [212].

Se presentan dos de estos indicadores generales que marcan las tendencias de evolución en el transporte. En la Figura 8. 1 se muestra la evolución del transporte de mercancías por aire en España desde el año 2004. Se observa una clara tendencia creciente, donde el crecimiento del comercio online en los últimos 5 años ha representado un incremento notable. Las previsiones confirman esta tendencia creciente durante los próximos años. Un

incremento en el transporte de mercancías se traduce en la necesidad de mayor número de vehículos destinados a tal fin, así como un importante aumento en las necesidades logísticas asociadas. En el caso del transporte de mercancías, la intermodalidad tiene un papel fundamental, debido a la hiperespecialización del modo de transporte utilizado en función de las etapas del transporte, vinculadas a las distancias recorridas en cada una de ellas. El considerable aumento de transporte de mercancías en buques y aeronaves se traduce en un incremento de las necesidades de transporte terrestre, tanto para la distribución territorial como para el reparto de la última milla.

El segundo indicador presentado se muestra en la Figura 8. 2, y es el índice del precio del consumidor de transporte. Se analizaron los datos desde el año 2015, que presentan una tendencia creciente. Desde el punto de vista de los costes, y en base a los resultados presentados en el capítulo 7, derivados de la simulación en una ciudad de referencia, se puede interpretar que el claro sobredimensionamiento del actual modelo de movilidad, sustentado en su mayoría por automóviles de combustibles fósiles particulares, y la total ineficiencia del sistema tiene una repercusión directa en los precios para los consumidores finales. En modelos de movilidad en los que el usuario no tenga que adquirir un vehículo privado para poder gozar de una movilidad total, los costes asociados se reducirán notablemente.

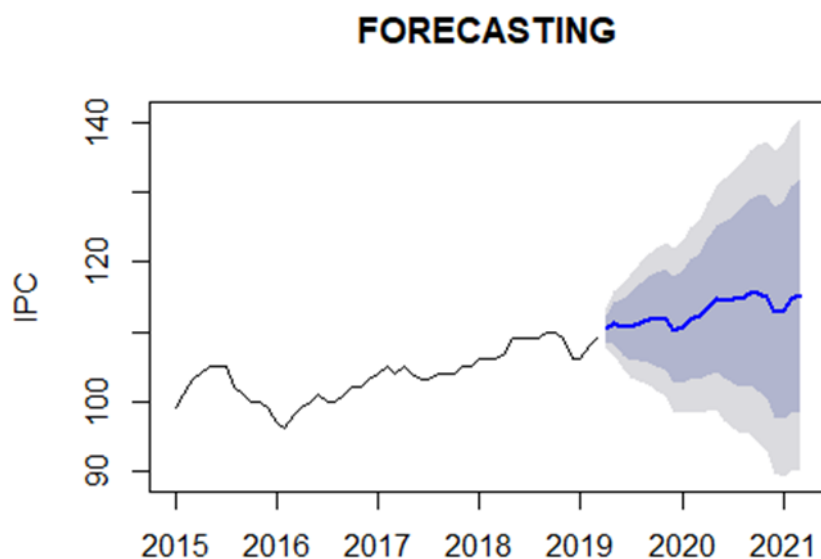


Figura 8. 2. Evolución del índice de precio del consumidor de transporte [212].

El conjunto de indicadores analizados, junto a la identificación de los parámetros estratégicos asociados a cada sector, permitieron obtener las previsiones de evolución. La implementación del sistema de transporte automatizado tiene un impacto directo en el parque móvil necesario para satisfacer las demandas de movilidad, tanto de personas como de mercancías. La variación en el número de vehículos por clases es un dato estratégico para determinar el impacto en los indicadores macroeconómicos. En la Tabla 8. 1 se presenta las previsiones de evolución del parque móvil en España en los tres escenarios de transición explicados. Los resultados de esta tabla serán comentados en el apartado 8.2.2.1, donde se analiza en detalle la evolución de la industria de automoción.



Tabla 8. 1. Evolución del parque móvil en función de los diferentes escenarios de la transición [212].

	CURRENT Nº VEHICLES	TRANSITION 20%	Nº VEHICLES (T20%)	TRANSITION 50%	Nº VEHICLES (T50%)	TRANSITION 100%	Nº VEHICLES (T100%)
Trucks and vans	4,924,476.00	-8%	4,530,517.92	-15%	4,185,804.60	-32%	3,348,643.68
Buses	63,589.00	12%	71,219.68	25%	79,486.25	48%	94,111.72
Passenger private vehicles	23,500,401.00	-15%	19,975,340.85	-31%	16,215,276.69	-70%	7,050,120.30
Motorcycles	3,327,048.00	-16%	2,794,720.32	-42%	1,929,687.84	-88%	399,245.76
Industrial Tractor	218,154.00	-	218,154.00	-	218,154.00	-	218,154.00

Una vez analizados este conjunto de indicadores genéricos que marcan las tendencias globales del transporte, su evolución y líneas estratégicas, se elaboró el estudio pormenorizado de los diferentes sectores, analizando en cada uno de ellos su impacto en el PIB. Se valoró la influencia directa en cada uno de los tres escenarios de la transición, de forma que se pueda obtener la visión general de la evolución en cada sector. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8. 2.

El conjunto de industrias y sectores analizados en el estudio representaban el 38,16 % del PIB de España, lo que correspondía a 445.067 millones de €. Los datos utilizados en el estudio corresponden a 2017, donde el PIB total de España era de 1.166.319 millones de €.

Tabla 8. 2. Evolución del impacto en el PIB (en millones de €) de los diferentes sectores analizados en los tres escenarios de la transición [212].

	CURRENT GDP	CURRENT GDP	TRANSITION 20%	GDP (T20%)	TRANSITION 50%	GDP (T50%)	TRANSITION 100%	GDP (T100%)
Equipment industry	3%	35.805,99€	-5%	34.015,69 €	-10%	32.225,39 €	-16%	30.077,03 €
Goods transport	8%	93.305,52€	9%	101.703,02 €	26%	117.564,96 €	58%	147.422,72 €
No-life insurance industry	0.90%	10.496,87€	-5%	9.972,03€	-50%	5.248,44 €	-65%	3.673,90 €
Professionals concerned	0,27%	3.149,06 €	-10%	2.834,16 €	-44%	1.763,47 €	-85%	472,36 €
Technological industry	1.20%	13.995,83 €	25%	17.494,79 €	80%	25.192,49 €	160%	36.389,15 €
Health	1%	11.663,19 €	-23%	8.980,66 €	-60%	4.665,28 €	-90%	1.166,32 €
Passenger transport	8%	93.305,52 €	8%	100.769,96 €	25%	116.631,90 €	55%	144.623,56 €
Energy industry	2.50%	26.242,18 €	-24%	19.944,05 €	-55%	11.808,98 €	-98%	524,84 €
Repair and maintenance industry	3,47%	40.471,27 €	-3%	39.257,13 €	-10%	36.424,14 €	-15%	34.400,58 €
Automotive industry	10%	116.631,90 €	-15%	99.137,12 €	-45%	64.147,55 €	-70%	34.989,57 €
TOTAL	38,16%	445.067,33€	-	434.108,60€	-	415.672,59€	-	433.740,04€



Se observa que el impacto del despliegue de un sistema de transporte automatizado depende mucho del sector o industria en cuestión, algunos de ellos se verán afectados de manera muy positiva, experimentando un gran crecimiento en las diferentes etapas, mientras que otros se verán afectados negativamente.

Con carácter general, en la última etapa, es decir, completada la transición, el impacto global en el PIB de España de la movilidad se verá reducido, pasando de 445.067 millones de € a 433.740 millones de €. La interpretación está asociada directamente a la esencia del sistema de transporte automatizado, a sus objetivos principales. Las industrias que se ven afectadas negativamente en mayor medida, y cuyo impacto en el PIB es muy representativo, son las industrias de la automoción y la energética (combustibles fósiles). El sistema de transporte automatizado consigue un sistema de movilidad eficiente, sin necesidad de tener un sobredimensionamiento exagerado del número de vehículos sobre las calles, optimizando las rutas que realizan y, por tanto, optimizando la energía utilizada. El cambio hacia fuentes de energía renovable tiene grandes beneficios ambientales y económicos.

A continuación, se analiza cada uno de estos sectores e industrias en detalle, para evaluar el impacto directo del sistema de transporte automatizado.

8.2.2. Análisis de los diferentes sectores

En este apartado se valora el impacto sectorial del nuevo sistema de transporte automatizado.

8.2.2.1. Industria de la automoción

La industria de la automoción es un sector compuesto por el conjunto de fabricantes de automóviles. Es un sector muy importante en la economía del país, que representa actualmente aproximadamente el 10% del PIB, a pesar de que ninguno de estos grupos industriales es español. Al igual que ocurre en todo el mundo, la tendencia de crecimiento en el número de vehículos aumenta de manera constante. En el año 2018 se vendieron en el mundo 95 millones de vehículos. Teniendo en cuenta los objetivos y previsiones de crecimiento constantes, si se sigue con el modelo actual, en la próxima década se habrán puesto sobre las calles y carreteras del mundo más de 1000 millones de nuevos vehículos. Es el principal objetivo del sector automotriz. Sin embargo, han aparecido los primeros indicadores del cambio de tendencia. En el año 2019, se redujo el número de vehículos vendidos a 90,4 millones. Los datos del año 2020 son más impactantes, el número global de ventas cayó hasta los 77,9 millones, debido a la pandemia del COVID-19, pero generando una grave crisis al sector [213].

Es el sector que representa a la perfección el actual modelo de transporte, basado mayoritariamente en el uso del vehículo privado para los desplazamientos. Sin embargo, la gente demanda nuevos modelos de movilidad, y los recientes desarrollos tecnológicos han permitido la entrada en el mercado de soluciones alternativas a la compra de un vehículo particular. Estas nuevas soluciones cuestionan la utilidad de poseer un vehículo, especialmente en grandes áreas urbanas, donde el coche se convierte en un problema, en vez de en una solución de movilidad. Investigaciones recientes [121], [122] presentan los

nuevos modelos de negocio, como los servicios de movilidad compartida, servicios bajo demanda o los conocidos como Maas (*"Mobility as a Service"*), como la alternativa con potencial para convertirse en mayoritaria en las principales ciudades del mundo. Son modelos de negocio en los que el usuario no adquiere un vehículo en propiedad, sino que contrata los servicios específicos de movilidad que necesita. Se cuestionan por tanto la producción masiva de automóviles tal y como se conoce en la actualidad.

Los resultados obtenidos de la estimación realizada en la evolución del parque móvil, presentados en la Tabla 8. 1, ponen de manifiesto esta tendencia en el sector. El grupo de vehículos particulares son los que sufren una reducción drástica. Los turismos, llegada la última fase de la transición, podrían experimentar una reducción del 70%, pasando de los 23,5 millones actuales a 7 millones. Esto concuerda con el análisis realizado en el apartado 7.3.3, siendo la reducción del número de vehículos en una ciudad en situación ideal del 94 %, pero añadiendo los factores que las circunstancias reales influyan en esta situación. La reducción del 70 % de la flota mayoritaria, la de turismos, es un dato bastante fiable para tener en cuenta. En el caso de las motocicletas, esta reducción se prevé incluso mayor, del 88%. La explicación principal se encuentra en los motivos por los que muchos usuarios utilizan motos en las ciudades principalmente, y es para evitar las largas colas en los atascos. En el momento en el que se erradiquen los problemas de congestión, el uso de las motos quedará relegado a los amantes de las mismas, más como hobby que como medio necesario de movilidad. Por el contrario, el grupo de los autobuses experimentará un crecimiento considerable, del orden del 48%. La razón radica en la movilidad urbana, al considerar dentro de este tipo de vehículos a los ingenios de los grupos de entre 8-12 plazas y los de 14-18 plazas, que como muestran los resultados de la simulación en la ciudad de referencia, se presentan como mayoritarios en las ciudades. Los modelos de negocio de movilidad compartida optarán por vehículos de estas capacidades al ofrecer mejores rendimientos a sus operadores de flota.

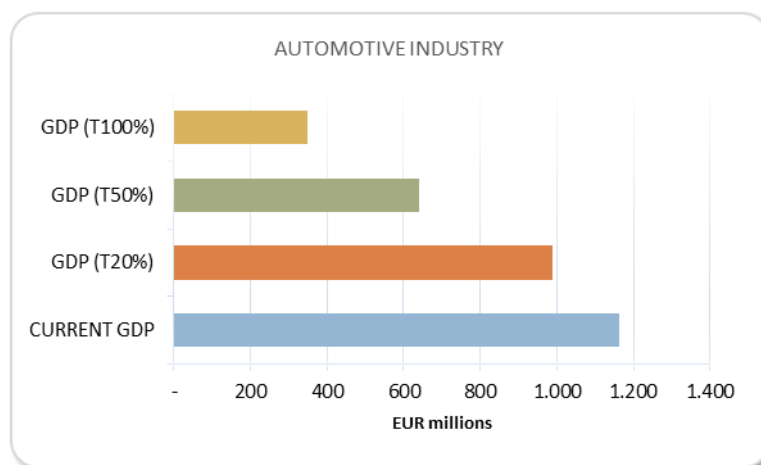


Figura 8. 3. Previsión de la evolución del PIB de la industria de la automoción [212].

La Figura 8. 3 presenta los resultados de la previsión realizada del impacto del sector de la automoción en el PIB. La caída continuada está relacionada con la progresiva caída en las ventas al tiempo que se van implementando los nuevos servicios de movilidad automatizada. Es un sector que se verá terriblemente afectado por esta revolución, por lo que un país como España, donde tiene tanto impacto en su economía global, debería

trabajar con urgencia en la construcción de nuevas alternativas industriales para hacer frente a semejante caída.

8.2.2.2. Industria de equipos y componentes

La industria de equipos y componentes está formada por todos aquellos grupos empresariales vinculados al sector de la automoción, que actúan como proveedores de las grandes matrices internacionales. A pesar de que su influencia actual en el PIB es notablemente inferior a la de la industria automotriz, es un sector muy importante a nivel nacional, debido que la mayoría de estas empresas sí que pertenecen a grupos de origen español. Es un sector con un impacto del 3 % en el PIB en la actualidad.

A pesar de la drástica reducción en el número de vehículos, el previsible declive de la industria de la automoción, y los restrictivos contratos que tiene este sector con las multinacionales automovilísticas, presentan una mayor capacidad y flexibilidad para adaptarse a las necesidades de los nuevos ingenios. La caída en las ventas de automóviles es un hecho que afectará inevitablemente a la industria de equipos y componentes. Pero los procesos de reconversión tecnológica e industrial para adaptarse a las necesidades y diseños de los nuevos ingenios no son tan gigantescos como los de la industria de la automoción, en gran medida debido al volumen de cada una de ellas. Además, las elevadas tasas de uso diario de los nuevos ingenios elevarán a su vez la tasa de reposición de los mismos, así como la de repuestos y recambios necesarios.

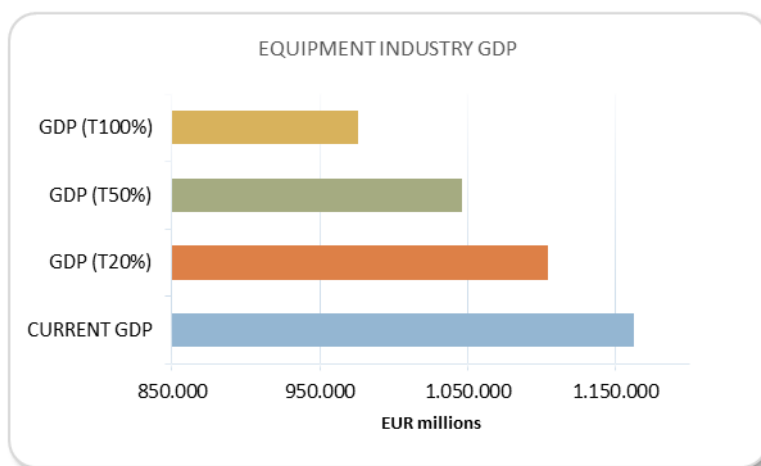


Figura 8. 4. Previsión de la evolución del PIB de la industria de equipos y componentes [212].

Se presentan en la Figura 8. 4 los resultados de la previsión en la evolución del impacto de este sector en el PIB. Una vez completada la transición, la caída esperada se aproxima al 16 %.

8.2.2.3. Transporte de mercancías

El transporte de mercancías es uno de los sectores que se ven afectados en mayor medida por la implementación de un sistema de transporte automatizado. Los criterios para el transporte de mercancías son diferentes a los del transporte de personas, y la eficiencia en

términos globales tiene una mayor importancia, al igual que la logística, sobre el ciclo completo de desplazamiento.

Una de las principales ventajas de las que se beneficia este sector es la característica de los nuevos ingenios de no necesitar un conductor, lo cual significa que la hora del día en la que se transportan las mercancías pierde importancia, pudiendo rentabilizar al máximo las horas nocturnas. Además, se suprimen también todas las paradas y descansos que necesitan los conductores en los trayectos de larga distancia o duración. Y desde el punto de vista de los costes, esta ausencia de conductor también es muy importante.

El crecimiento constante del comercio online ha cambiado la logística en el reparto de mercancías, especialmente en la última milla. Los consumidores cada vez van menos a las tiendas a comprar productos, y realizan estas compras desde sus casas. El cambio logístico de entregar los productos en las tiendas a entregarlos en las casas particulares supone un gran salto, ya que se incrementan por miles el número de destinos finales. Esto afecta directamente a las necesidades de transporte, y el número de ingenios que se necesitan para tal fin. Estas necesidades logísticas también tienen sus particularidades, ya que no es lo mismo el reparto de última milla en una gran ciudad que en un pequeño pueblo situado en una zona montañosa. El diseño de ingenios pensados para estos fines será fundamental.

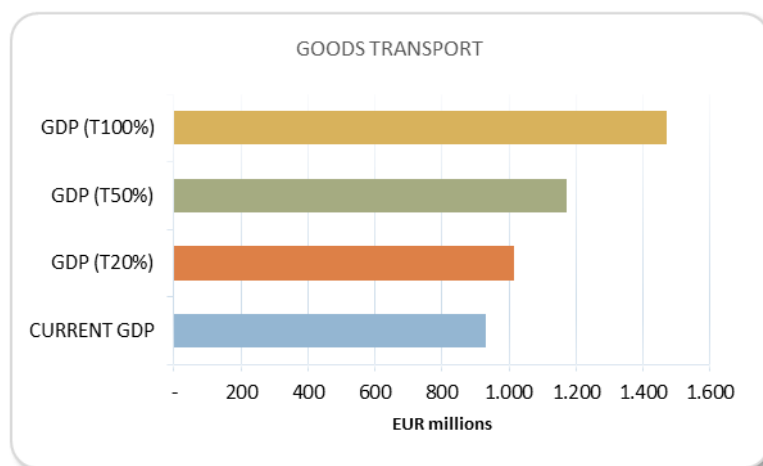


Figura 8. 5. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector del transporte de mercancías [212].

En este caso, tal y como muestra la Figura 8. 5, es un sector que se ve muy beneficiado por el sistema de transporte automatizado. En la actualidad el impacto en el PIB es aproximadamente del 8 %. Una vez se ha llegado a la última etapa de la transición se estima que el sector haya experimentado un crecimiento cercano al 58 %.

8.2.2.4. Transporte de personas

Los grandes beneficiarios de la automatización del transporte son los pasajeros, las personas. Es el principal objetivo del sistema de transporte automatizado, concebido para resolver los graves problemas del modelo de transporte actual.

La media diaria que viaja una persona en España al día es de 41,6 km [210], que es una cifra bastante importante. Una de las consecuencias de la problemática del actual sistema de transporte es que la gente no se mueve todo lo que idealmente desearía, debido al estrés o agobio que generan situaciones como la dificultad de aparcamiento, el coste del mismo,

o las largas retenciones de tráfico que se sufren diariamente, entre otros muchos factores disuasorios. Existen también muchas situaciones en las que el desplazamiento no se produce simplemente por la imposibilidad del mismo. En la inmensa mayoría de ciudades pequeñas o pueblos del país, para ir a un pueblo cercano no existe una solución de transporte público o colectivo directa. Y en aquellas en las que sí existe, hay muy pocas conexiones diarias, que condicionan enormemente la decisión de viajar. Ante esta casuística, el vehículo particular se presenta como la única solución. Y todas aquellas personas que por un motivo u otro no tienen acceso temporal o permanente a este vehículo privado, sencillamente no pueden viajar.

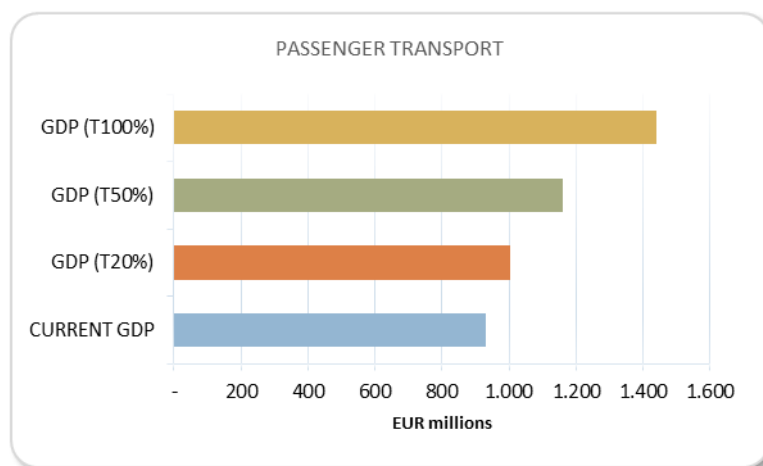


Figura 8. 6. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector del transporte de pasajeros [212].

El sistema de transporte automatizado permite revertir todas estas circunstancias adversas, desde la problemática en los núcleos urbanos, donde un sistema de movilidad eficiente, seguro, sostenible y amable facilite que se realicen todos los viajes que se desean, hasta aquellas zonas interurbanas donde se proporcionen alternativas permanentes de movilidad bajo demanda. En definitiva, la automatización abre las posibilidades de movilidad a numerosos colectivos de personas a los que el actual sistema de transporte excluye, como con los menores de edad, personas con movilidad reducida o algún tipo de discapacidad, o la tercera edad, además de todas aquellas personas que no tienen el permiso de conducir. Se ha estimado que el incremento global de los kilómetros recorridos, una vez completada la transición, se pueda multiplicar por un factor de 1,5.

La Figura 8. 6 presenta los resultados obtenidos de la evolución del impacto en el PIB del sector del transporte de pasajeros. En la actualidad representa aproximadamente el 8 %, y una vez completada la transición experimentaría un crecimiento cercano al 55 %.

8.2.2.5. Seguros de no vida

La industria de los seguros de no vida, en especial aquellos relacionados con la industria de la automoción, se verá tremendamente afectada por la automatización del tráfico. Existen dos factores principales que determinan el impacto en este sector: la drástica reducción en la flota de vehículos y la gran reducción en el número de accidentes. Si hay menos ingenios significa que los seguros tendrán menos clientes que los contraten, y si las probabilidades de accidente se reducen en gran medida, también afectará las condiciones de los seguros.

No obstante, es importante destacar que, en las primeras fases, en especial en las etapas de experimentación y primeros años de servicios comerciales, los seguros de los ingenios autónomos experimenten un aumento en su precio al tratarse de una nueva tecnología experimental. En el momento que se concluyan las etapas experimentales y se establezcan los protocolos de certificación, habiéndose demostrado con datos reales la fiabilidad de los sistemas autónomos, esta tendencia en los seguros se invertirá a la baja.

Los sistemas autónomos reemplazan al conductor, y como se ha explicado a lo largo de esta tesis, elevan el nivel de fiabilidad y seguridad a unos niveles inalcanzables para un ser humano, traduciéndose en la drástica reducción de accidentes. Recordemos que los conductores son los responsables del 93 % de los accidentes ocasionados. Esto se traducirá en la reducción a mínimos de víctimas mortales, heridos hospitalizados, heridos no hospitalizados, sus respectivas indemnizaciones, así como de accidentes leves sin heridos. Significa por tanto que las tarifas de los seguros se irán reduciendo en la medida que se reduzcan las tasas de accidentalidad.

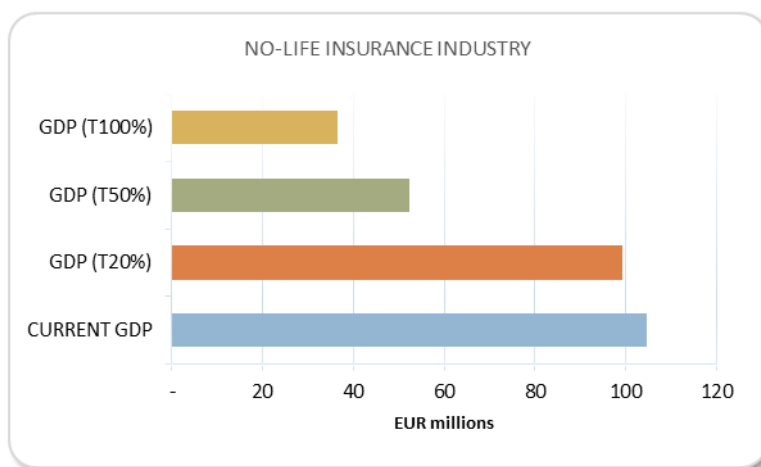


Figura 8. 7. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector de los seguros de no vida [212].

En cifras, actualmente el sector representa el 0,9 % del PIB. Como se muestra en la Figura 8. 7, en las primeras etapas de la transición la reducción será muy leve, mientras que a medida que los ingenios autónomos copen el mercado esta reducción se acentuará. Se estima que una vez completada la transición el sector habrá experimentado una caída cercana al 65 %.

8.2.2.6. Industria de reparación y mantenimiento

Dentro del sector del transporte, la industria de los centros y talleres de reparación y mantenimiento juegan un papel muy importante. Los vehículos se averían debido a su uso y a los incidentes o accidentes que sufren a lo largo de su ciclo de vida. De la misma forma durante este ciclo de vida necesitan de una serie de repuestos que es necesario realizar cada determinado tiempo, como pueden ser los neumáticos, por ejemplo.

La revolución que supone la automatización del tráfico implica un profundo cambio tecnológico, ya que la ingeniería de los nuevos ingenios difiere bastante de la tecnología de los vehículos convencionales. Esto implica que todos estos talleres y centros de



mantenimiento tienen que adaptar su oficio a las características y necesidades de estos nuevos ingenios.

El impacto en esta industria seguirá una tendencia diferente, porque a pesar de la considerable reducción del parque móvil y de los accidentes ocasionados, reduciéndose también las necesidades de reparación, el mantenimiento se reinterpretará. Es importante darse cuenta que el sistema de transporte automatizado está diseñado para maximizar el uso de cada ingenio, lo cual significa que estén en circulación la mayor parte del tiempo posible. El cambio de modelo hacia un escenario donde los operadores de flotas sean mayoritarios, obligará a redefinir también las estrategias de mantenimiento. Se asemejará al actual mantenimiento aeronáutico, que sigue estrictos protocolos para incrementar los niveles de fiabilidad y seguridad de los ingenios.

Actualmente el impacto de esta industria en el PIB es del 3,47 %, siendo su reducción en el tiempo más contenida que otros de los sectores analizados. Una vez completada la transición, tal y como se mostró en la Tabla 8. 2, su reducción se estima en un 15 %.

8.2.2.7. Profesionales del transporte

Es el sector formado por los diferentes profesionales de la conducción que, por razones evidentes, se ve tremendamente afectado por la automatización del tráfico. La característica más relevante de cualquier ingenio autónomo es que no necesita un conductor. Es su propio sistema autónomo el que se encarga de la tarea de la navegación. La tendencia en este sector es clara, cuanto mayor cuota de mercado ocupen los ingenios autónomos, menos conductores existirán.

Es fundamental diseñar estrategias de reconversión profesional para todos los afectados de este colectivo, para minimizar de esta forma las consecuencias laborales y evitar grandes dramas sociales. No obstante, varias compañías que ofrezcan servicios de movilidad compartida o movilidad bajo demanda, optarán por la figura de un asistente de a bordo, con el fin de ayudar o dar servicio al pasaje, en especial en las primeras etapas de la transición. Es un perfil profesional de fácil reconversión.

Las estrategias de reconversión profesional hacia perfiles similares dentro de los servicios de movilidad son las que minimizarán la gran caída del sector. La tendencia de reducción del sector es más o menos proporcional a la reducción de vehículos convencionales en el mercado. Una vez completada la transición, de acuerdo a los resultados de la Tabla 8. 2, el impacto económico en el PIB se reducirá aproximadamente en un 85%.

8.2.2.8. Nueva industria tecnológica

La ingeniería de los vehículos convencionales y la ingeniería de los ingenios autónomos y eléctricos son muy diferentes. Mientras que en los automóviles clásicos la mecánica tiene un papel fundamental, diseñados para su conducción por personas, en los nuevos ingenios el software y el hardware son las tecnologías predominantes, ya que es un computador quien se encarga de la navegación.

Este cambio de ingeniería implica grandes procesos de reconversión industrial. La industria de automoción se enfrenta a estos procesos de reconversión industrial, tanto en las

tecnologías desarrolladas como en los profesionales afectados, lo cual requiere de grandísimos esfuerzos económicos. Es un reto muy complejo de afrontar para un sector, que como hemos analizado con anterioridad, se enfrenta también a una caída tremenda en sus ventas.

Es el principal motivo por el que han surgido y siguen emergiendo nuevas empresas tecnológicas que están desarrollando las tecnologías de los nuevos ingenios. De hecho, los actuales referentes en conducción autónoma, mencionados a lo largo de esta tesis, no se corresponden con la industria automotriz convencional, sino que son nuevas empresas o grandes grupos tecnológicos que han adelantado al sector automotriz convencional, comprometiendo aún más su situación.

Vinculados a estas nuevas empresas tecnológicas aparecen también nuevos modelos de negocio, como son los operadores de telecomunicaciones, gestores del tráfico autónomo, aplicaciones de Big Data o inteligencia artificial, tecnologías I2X, etc. Es un sector que requiere fuertes inversiones, pero cuyos márgenes comerciales son muy superiores a los de la industria convencional.

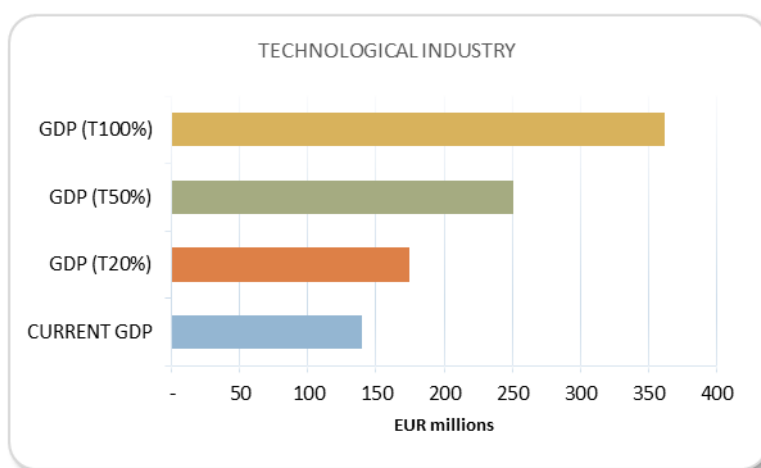


Figura 8. 8. Previsión de la evolución del impacto en el PIB en la industria tecnológica nacional [212].

Sin lugar a dudas, de los sectores que se verán afectados directamente por la implementación del sistema de transporte automatizado, será el que experimentará un mayor crecimiento. En la Figura 8. 8 se presentan los resultados de esta evolución, estimando su crecimiento, una vez se haya completado la transición, en un 160 %. Es un dato bastante volátil, porque depende en gran medida de la estrategia nacional que se adopte en relación a este sector. No es lo mismo apostar por esta nueva industria tecnológica que optar por importar soluciones exteriores.

8.2.2.9. Salud

El sector de la salud se ve muy afectado por el transporte. En el estado del arte se presentaron algunos datos relevantes, especialmente los relacionados con los costes sanitarios que generan los heridos en los accidentes de tráfico. Todas estas personas requieren de servicios médicos, que representan un coste muy elevado. La DGT estima un coste anual superior a los 10.000 millones de € a nivel nacional [9].

Al contrario que ha ocurrido con los fallecimientos en carretera, que durante las últimas décadas se ha conseguido reducir su cantidad, en el caso de los heridos no hospitalizados han aumentado considerablemente, especialmente desde el año 2011.

Como ya se ha mencionado, una de las singularidades de los ingenios autónomos es que reemplazarán al conductor humano, eliminando por tanto el temido error humano, y reduciendo drásticamente los accidentes de tráfico. Esto tendrá un impacto directo en los costes sanitarios derivados de estas elevadas tasas de siniestralidad. Se conseguirá un ahorro importante en los costes médicos y se producirá una descongestión en los servicios de salud.

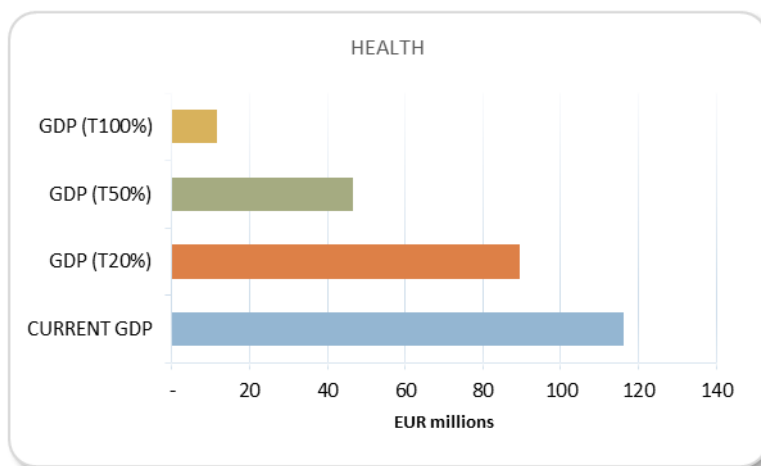


Figura 8. 9. Previsión de la evolución del impacto en el PIB en el sector de la salud asociado al tráfico [212].

La Figura 8. 9 expone los resultados de las previsiones de evolución del sector. Se estima que una vez se haya completado la transición, el impacto económico sanitario vinculado al tráfico se habrá reducido en un 90 %.

8.2.2.10. Combustibles fósiles

El gran éxito de los automóviles de combustión durante el último siglo hizo crecer al sector de los combustibles fósiles enormemente, hasta el punto de convertirse en uno de los sectores más importantes y poderosos.

La irrupción de sistemas propulsivos que emplean tecnologías sostenibles, como los vehículos eléctricos, pone en jaque el negocio de este sector. La electrificación del parque móvil saca de la ecuación a los combustibles fósiles. A pesar de la importancia de este sector en las economías de los distintos países, los diferentes gobiernos han diseñado estrategias en los últimos años para favorecer la sostenibilidad medioambiental, incluyendo numerosos planes y medidas contrarias a los intereses de este sector. En muchos países ya existe fecha de prohibición, tanto de la fabricación como de la venta de automóviles de combustibles fósiles. El argumento principal es sencillo, se antepone la salud de las personas ante cualquier interés económico particular.

Es un sector con fecha de caducidad, que será reemplazado por un nuevo sector energético, formado por todos aquellos actores pertenecientes a las energías de origen renovable y climáticamente neutras.

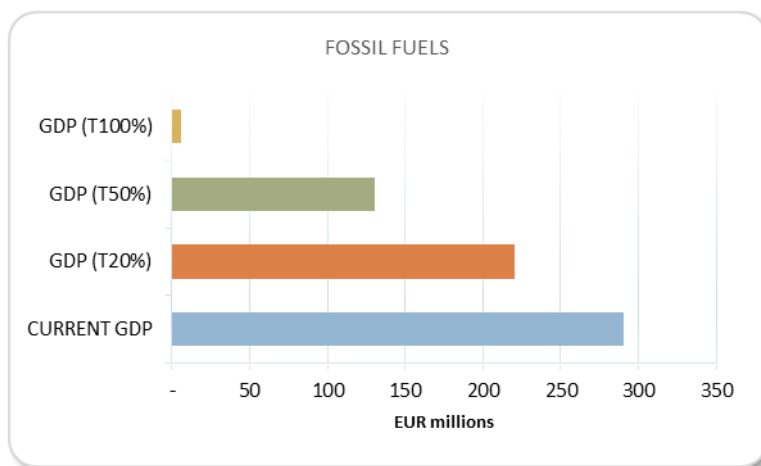


Figura 8. 10. Previsión de la evolución del impacto en el PIB del sector de los combustibles fósiles [212].

Entre los sectores que se verán afectados de manera directa por la implementación de un sistema de transporte automatizado, el de los combustibles fósiles es, sin lugar a dudas, el más perjudicado. La apuesta por la electrificación del parque móvil, ya en marcha, determina la clara tendencia en su evolución. Tal y como se presenta en la Figura 8. 10, una vez se haya completado la transición, el sector se habrá reducido en un 98 %.

8.2.2.11. Infraestructuras

El sector de las infraestructuras tiene un rol destacado en el transporte actual, al igual que lo tendrá en el nuevo sistema de movilidad automatizado. En España existe una red viaria de muy alta calidad y muy buenas conexiones. En el apartado 9.4 se analiza la capacidad de las infraestructuras, y como se concluye en dicho análisis, no es necesario construir más carreteras ni para incrementar la capacidad de transporte ni para mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto.

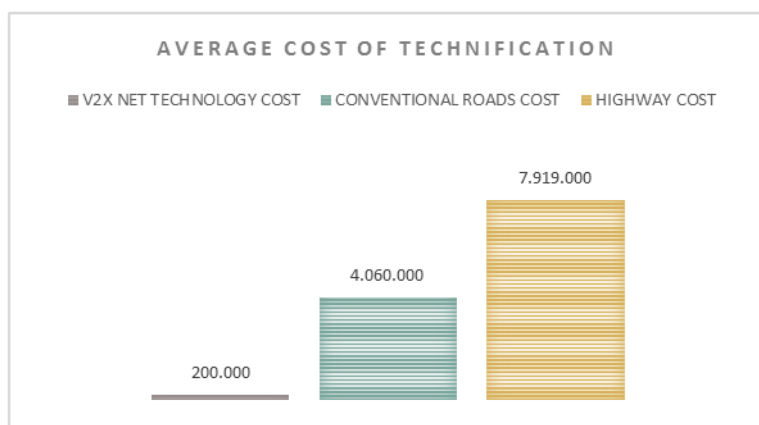


Figura 8. 11. Coste medio de tecnificación de las infraestructuras para el despliegue del sistema de transporte automatizado [212].

Sin embargo, sí que es necesario adaptar las infraestructuras actuales, hay que añadirles una capa de inteligencia. En primer lugar, como se expuso en el apartado 5.2.1.1, es necesario digitalizar los viales existentes, para generar los entornos tridimensionales de navegación. Y en segundo lugar, como se analizó en el apartado 5.3, es necesario



desplegar una red de comunicaciones, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de transporte automatizado.

Desde el punto de vista de las infraestructuras hace falta abordar la inversión necesaria para virtualizar los entornos de navegación y desplegar la red de comunicaciones. En la Figura 8. 11, se presenta el coste medio estimado de tecnificación por kilómetro de vial. Al compararlo con los costes medios de construcción de los mismos se observa que es inmensamente inferior.

8.2.2.12. Urbanismo

La nueva era del transporte, con la automatización del tráfico, trae una nueva concepción de las ciudades. Tiempo atrás, las ciudades eran diseñadas para los ciudadanos. En el último siglo, con la irrupción y rápido crecimiento de los automóviles, se cambió esta tendencia, y se comenzó a diseñar las ciudades para los coches. Es un modelo pensado para dar cabida a más y más coches cada año.

El despliegue del sistema automatizado de transporte, como ya se ha presentado, trae consigo importantes reducciones del parque móvil. Esto no solamente se traduce en una reducción considerable del número de ingenios en circulación, sino también del número de ingenios estacionados o aparcados como ocurre en la actualidad. Se consigue, por lo tanto, liberar espacio en las ciudades proveniente tanto de la posible reducción de vías de circulación como, sobre todo, de la desaparición de aparcamientos.

La liberación generalizada de espacio destinado a los coches permitirá recuperarlo en favor de los ciudadanos. El sector de la planificación urbanística presenta unas perspectivas de crecimiento muy favorables. Todos estos espacios liberados podrán destinarse a espacios verdes, carriles bici, zonas de ocio, etc. que incrementen el bienestar social de la población.

Además, la planificación urbanística tendrá un papel destacado en la concepción de los nuevos modelos de negocio y la adaptación de las infraestructuras urbanas a las necesidades de los nuevos ingenios. Por poner un ejemplo, el comercio electrónico ha incrementado notablemente el número de transacciones comerciales online, aumentando las necesidades y el volumen de transporte en la última milla. Hasta tal punto que se ha convertido en un problema. Las casas no están concebidas para recibir paquetes, como si lo están para recibir cartas, por ejemplo. Adaptar los diseños urbanísticos a nuevas necesidades, como la recepción de paquetes, generará un gran margen comercial que permitirá experimentar un gran crecimiento a este sector.

Las conclusiones de este estudio sobre el impacto económico de la automatización del tráfico son muy reveladoras. En primer lugar, la necesidad que tiene cualquier gobierno de diseñar una estrategia con celeridad para preparar la transición, debido a la gran repercusión económica que tendrá esta revolución en el transporte. Hay sectores a los que el nuevo modelo de movilidad reduce drásticamente sus cuotas de mercado, mientras que en otros sectores su potencial de crecimiento es muy grande. Definir y planificar las estrategias nacionales para realizar esta transición tecnológica e industrial es vital para que no se produzca un gran mazazo económico, que derive en dramas socioeconómicos de gran calado.



9. IMPLICACIONES Y BENEFICIOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE AUTOMATIZADO

Afrontar un reto como la automatización del tráfico, con la magnitud y complejidad que representa, se realiza porque los beneficios que tendrá para una nación son muy importantes y con un gran calado social.

La esencia del diseño de un sistema de transporte automatizado está en proporcionar una solución global a la problemática del actual modelo de transporte, analizada en el Estado del Arte (capítulo 2). A diferencia de la gran mayoría de investigaciones y propuestas actuales, focalizadas en dar una solución parcial a los problemas del transporte, el modelo de movilidad presentado en esta tesis doctoral aporta un análisis global del transporte que permite obtener una solución integral para mejorar la movilidad de personas y mercancías.

Reemplazar el actual parque móvil por vehículos eléctricos, o con otras tecnologías sostenibles, permite afrontar el problema de la contaminación. La automatización de estos nuevos vehículos proporciona una prometedora solución a los accidentes. Se analizaron las diferencias entre la automatización de los vehículos y la automatización del tráfico en el capítulo 4. Es precisamente la automatización del tráfico el hecho diferencial que permitirá remediar los problemas de congestión, además de presentar mejoras añadidas a los problemas de contaminación y accidentalidad, en comparación con las soluciones parciales.

Identificar la totalidad de beneficios y ventajas que tiene un sistema de transporte automatizado a nivel nacional es una tarea compleja, y hay que tener en cuenta que muchos de ellos no es posible predecirlos hasta que se haya implantado. En este capítulo se analizan los beneficios más relevantes, con un mayor impacto en la sociedad. Son los siguientes:

- Sostenibilidad
- Seguridad
- Redefinición de patrones de movilidad y reglas de tráfico
- Del tráfico por lotes al tráfico de flujos
- Triple Click para la gestión de emergencias
- Movilidad integral bajo demanda
- Intermodalidad
- Nueva estructura económica del transporte
- Recuperación de las ciudades para las personas

9.1. Sostenibilidad

El sistema de transporte automatizado se caracteriza por la navegación autónoma de ingenios, que como se indicó en su definición, son vehículos autónomos y sostenibles. Entendiendo la sostenibilidad como una cuestión medioambiental, cuyo objetivo principal es conseguir vehículos climáticamente neutros, que no contaminen el aire y no representen



una amenaza para la salud de las personas. Los beneficios de los ingenios así definidos son equiparables a los beneficios de cualquier vehículo eléctrico, de hidrógeno o de cualquier otra tecnología propulsiva sostenible.

El beneficio directo más importante es la eliminación de la emisión de gases contaminantes en el funcionamiento de los vehículos. Vehículos o ingenios con un sistema propulsivo no contaminante son activos fundamentales en el proceso de limpieza del aire. Teniendo en cuenta que la gran mayoría de desplazamientos se realizan en núcleos urbanos, la transformación a flotas completamente sostenibles permitirá erradicar las emisiones de sustancias nocivas derivadas del transporte. Un ejemplo práctico se vivió recientemente con el confinamiento general en España derivado de la pandemia del COVID-19. La circulación desapareció de todas las ciudades, traduciéndose en la limpieza del aire en las mismas, y comprobando experimentalmente el tremendo impacto que tienen las emisiones del transporte. En un escenario con flotas completamente sostenibles, se producirá este mismo fenómeno, pero sin el cierre al tráfico y con una situación de movilidad normalizada.

Este proceso de electrificación del parque móvil supone, a su vez, una tarea titánica para generar la infraestructura de recarga de estos ingenios, y para adaptar de la red eléctrica, de forma que sea capaz de satisfacer la demanda energética de tantísimos ingenios, sin que represente un problema para el resto de servicios energéticos de una ciudad. La existencia de este sistema de transporte automatizado presenta dos ventajas principales, respecto a la simple electrificación del parque móvil en este aspecto.

En primer lugar, la gestión automatizada del tráfico, tal y como ya se ha analizado en capítulos anteriores, permitirá una reducción muy importante de los ingenios en circulación para satisfacer las demandas reales de movilidad. Esta gran reducción en el parque móvil representa también una gran reducción en el consumo energético, necesario para proporcionar servicios de movilidad a la ciudadanía.

En segundo lugar, esta automatización del tráfico permitirá optimizar las rutas del conjunto de usuarios y, combinado con el cambio en los modelos de negocio, con una clara evolución hacia la movilidad bajo demanda, personalizada para cada tipo de viaje, también permitirá la asignación del ingenio apropiado para cada caso. En la actualidad es muy frecuente utilizar un vehículo de 5 plazas para hacer un desplazamiento individual o utilizar una furgoneta con capacidad para transportar 500 kg para enviar un paquete de 0,5 kg a un pueblo a 100 km de una ciudad. Desde el punto de vista energético, esto significa un sobredimensionamiento enorme sobre el vehículo utilizado para la misión en cuestión, suponiendo un despilfarro energético. El nuevo modelo ofrece soluciones para evitar estos hechos y lograr una eficiencia energética en los desplazamientos, contribuyendo a la sostenibilidad general del sistema.

9.2. Seguridad

La razón de ser de los vehículos autónomos, y, por ende, de los ingenios autónomos, es conseguir eliminar el error humano responsable de la práctica totalidad de los accidentes y siniestros que se producen en transporte. Los sistemas autónomos ofrecen una serie de ventajas respecto a las personas en la tarea de conducción. La elevada capacidad de computación y su velocidad permiten procesar en tiempo real unas magnitudes de



información que una persona no es capaz. Este hecho permite al sistema autónomo estar compuesto por gran cantidad de sensores, que le proporcionan una visión completa de 360, además de la redundancia de sistemas, diseñada para mantener su funcionamiento en caso de fallo. El entrenamiento de un sistema autónomo es un proceso complejo, que requiere de mucho tiempo para alcanzar los niveles de fiabilidad necesarios para que puedan navegar en escenarios reales. Al tratarse de equipos y sistemas informáticos, este entrenamiento se acumula, y la experiencia adquirida, tanto en simulación como en pruebas, de numerosos ingenios diferentes se almacena en un único sistema autónomo. Esto se traduce en que el entrenamiento del sistema tendrá cientos de miles o millones de horas de experiencia, habiéndose enfrentado a una cantidad ingente de posibles situaciones de tráfico, incluyendo situaciones extremas. Esta experiencia no la puede alcanzar una persona. Otro de los factores importantes que contribuirá a la seguridad es la obediencia. Los sistemas autónomos respetan y cumplen siempre las reglas de tráfico establecidas en cada circunstancia.

Un escenario con el sistema de transporte automatizado incorpora todos los factores de los vehículos autónomos que contribuyen a la seguridad del tráfico. Además, se añaden una serie de características que proporcionan un plus de seguridad. Se destacan dos principales. Los tres niveles de inteligencia y la transparencia.

El sistema de transporte automatizado se caracteriza por la integración de diferentes elementos que proporcionan tres niveles de inteligencia: inteligencia embarcada (ingenios), inteligencia en la infraestructura (Red S3) e inteligencia en la nube (CCT).

Desde el punto de vista del sistema, el tráfico se caracteriza por ser transparente. Los ingenios están perfectamente identificados en todo momento, se conoce cuál su propósito, su origen, su destino, su ruta, su estado, etc. Esta información es muy relevante en la gestión del tráfico y la ejecución de las rutas. Cuanto mayor sea la información compartida entre los diferentes elementos del sistema, menor será el caos o el entorno potencialmente caótico por el que se desarrolle la navegación, y esto significará un incremento extra en la seguridad individual y global.

Combinando las ventajas de los tres niveles de inteligencia y la transparencia, se conseguirá elevar la seguridad a un nivel superior al de los vehículos autónomos independientes. Un caso práctico. Una situación potencialmente peligrosa que podría derivar en un accidente para un vehículo autónomo podría ser un niño que se encuentre detrás de un contenedor. A pesar de tener una información detallada del entorno (elementos estáticos) y de tener sus sistemas en pleno funcionamiento (detección de elementos dinámicos), la presencia de un contenedor genera una zona de nula visibilidad detrás del contenedor, y por lo tanto el niño no sería detectado por el sistema autónomo. Si el niño saltase a la carretera un instante antes de que pase el vehículo, podría producirse un accidente. Sin embargo, en un escenario con un sistema automatizado de tráfico, se podría detectar esta situación y prevenirla. Un ingenio que ya hubiese pasado antes u otro que circule en dirección contraria sí que serían capaces de detectar el objeto dinámico (niño), debido al diferente ángulo de visión de ese punto neutro, y comunicar la presencia del mismo a aquellos ingenios que circulen en su proximidad. Incluso en la circunstancia de que no circularan en ese momento otros ingenios, la existencia de inteligencia en la infraestructura (Red S3) podría detectar la presencia del niño y dar el pertinente aviso al ingenio. Y como este ejemplo, hay cientos de situaciones en las que los tres niveles de inteligencia y el principio de transparencia del sistema contribuyen de manera extra en la seguridad.



En definitiva, el sistema de transporte automatizado, o la automatización del tráfico, está formado por elementos inteligentes proactivos que permiten alcanzar un plus de seguridad en la movilidad.

9.3. Redefinición de los Patrones de Movilidad y Reglas del Tráfico

La implementación de un sistema de transporte automatizado representará el cambio del modelo de transporte. Se pasará de uno concebido para vehículos manejados por personas a un modelo de transporte diseñado para ingenios inteligentes, con capacidades de computación expandidas e integrados en un sistema con inteligencia distribuida.

La transición de un modelo a otro representa una serie de dificultades añadidas, debidas al propio proceso de convivencia. Las reglas de tráfico de un modelo y otro, a pesar de estar fundamentadas en los mismos principios, difieren mucho en sus características y formas. Las personas no tienen la capacidad de procesar las reglas de tráfico que puede gestionar un ingenio autónomo, mientras que las reglas de tráfico convencionales son altamente ineficientes para los sistemas autónomos. Sin embargo, en el momento que se culmine la transición, se hace posible la instauración de las reglas de tráfico adaptadas a los ingenios, que se traducirá en la redefinición de los patrones de movilidad.

Las actuales reglas de tráfico, en cualquiera de los tres contextos, están basadas en los mismos principios y presentan características similares. Las autoridades generan las normas de tránsito o circulación, estableciendo un código general de circulación, adaptado a los diferentes escenarios por los que circulan los vehículos. Este código de circulación debe ser aprendido por cualquier persona que desee manejar un vehículo, debiendo pasar un examen en el que demuestre el conocimiento del reglamento. A mayores, existen elementos distribuidos por las vías de circulación que marcan los principios generales y particulares de este código de circulación. Estos elementos son señales, semáforos u otros tipos de señalizaciones como pueden ser marcas viales, iluminaria, agentes de tráfico, etc. Son elementos analógicos para que las personas puedan identificarlos y reconocerlos. Además, se caracterizan por ser estáticos, se mantienen siempre iguales, y realizar cualquier tipo de modificación, bien sea sobre el reglamento o bien sobre los elementos es un proceso complejo y costoso por todas sus implicaciones.

Los actuales reglamentos de tráfico tienen dos principios fundamentales, la gestión de prioridades y el estado de circulación. En base a estos principios, se desarrollan los códigos de circulación. En el momento que existe más de un vehículo que circula por un espacio común, aparecen los conflictos de interés y es necesario determinar quién tiene la prioridad en las diferentes situaciones. La otra cuestión fundamental es establecer la forma en la que circulan estos vehículos por las diferentes vías y su estado (la velocidad, la iluminación, la carga, las dimensiones, etc.).

Las investigaciones y desarrollo actuales de los vehículos autónomos, según lo analizado en el capítulo 4, se centran en obtener sistemas autónomos que obedezcan las reglas del tráfico analógicas, diseñadas para la interpretación de los humanos. El despliegue del sistema de transporte automatizado presentado en esta tesis permite cambiar este



paradigma, y rediseñar las reglas del tráfico adaptadas a las capacidades reales de los ingenios, teniendo en cuenta la existencia de una gestión automatizada del tráfico.

El reglamento de circulación para ingenios con capacidades de navegación autónoma se caracteriza por ser digital y dinámico. Este nuevo paradigma tiene la necesidad de una gestión automatizada del tráfico. Es un escenario en el que todos los ingenios navegan bajo la tutela de un Centro de Control de Tráfico. Al comienzo de cada ruta se le proporciona al ingenio toda la información necesaria para su ejecución (en especial la relativa a los entornos de navegación) y se mantiene la conexión constante y en tiempo real mientras ejecutan las rutas. Con estas condiciones no hay problema en dar este salto cualitativo.

Las autoridades seguirán estableciendo las normas y reglamentos de circulación. Este código de circulación será digital y se le incorporará al ingenio de manera previa a que circule, garantizando su cumplimiento en todo momento. Los ingenios no tendrán la necesidad de que existan elementos distribuidos por los entornos de navegación que establezcan las normas de circulación. En el momento que exista un entorno de navegación digitalizado, y el CCT se encargue de la distribución adaptada de los diferentes entornos de navegación y sus características (en las que se incluyen las normas generales y específicas de circulación), el reconocimiento de elementos analógicos no será necesario.

La digitalización de las reglas de tráfico posibilita una característica notable, que estas reglas de tráfico sean dinámicas. La conexión en tiempo real del CCT con todos los ingenios permite que en un momento dado se modifique una regla de circulación en un entorno de navegación, y de manera inmediata, todos los ingenios afectados la cumplan. Por ejemplo, en una calle se podría reducir de manera instantánea el límite de velocidad debido a cualquier imprevisto o circunstancia que pudiera ocasionarse. Pero también se pueden establecer normas de circulación dinámicas sistemáticas. Un ejemplo de este caso puede ser una calle en la que se establece el límite de velocidad en 20 km/h durante las horas diurnas debido a la alta afluencia de gente, mientras que en horario nocturno se incrementa a 40 km/h por la ausencia de personas en la misma.

Este nuevo paradigma también afecta al uso de las diferentes vías de circulación. Aparece el concepto de carriles dinámicos. En una calzada están establecidos el número de carriles de circulación que existen y el sentido de los mismos. El sistema de transporte automatizado permite la generación de carriles dinámicos, que se caracterizan por poder ser modificados tanto en sentido como en cantidad. Un ejemplo, debido a la previsión de flujos de tráfico que hay en una ciudad a una determinada hora del día, se podría modificar el sentido de circulación de los carriles de una calle (parcial o totalmente) para favorecer el desarrollo y eficiencia del tráfico. Este cambio se gestiona desde el CCT y se produce de manera inmediata en todos los ingenios afectados. Otro ejemplo, una calle tiene una calzada con capacidad para 4 carriles. En función de la demanda de tráfico de que haya en los diferentes momentos del día, se podrían habilitar 1, 2, 3 o 4 carriles, variando su ubicación dentro de la misma calzada y el sentido de los mismos.

Este nuevo concepto de reglas digitales y dinámicas de tráfico representa uno de los mayores saltos cualitativos del sistema de transporte automatizado, contribuyendo muy notablemente en la eficiencia del tráfico, y permitiendo redefinir por completo las reglas de circulación y los patrones de movilidad tal y como se conocen en la actualidad.



9.4. Del Tráfico por Lotes al Tráfico de Flujos

La morfología de las ciudades y carreteras está repleta de todo tipo de intersecciones entre las vías de circulación, resultando puntos críticos en la circulación. La gestión de prioridades en estas intersecciones es imprescindible tanto para la seguridad como para la eficiencia del tráfico. Las particularidades de la regulación convencional concebida para las personas establecen tres formas de gestión en la mayoría de las intersecciones, los semáforos, los ceda el paso y los stop. Dependiendo de las características de las intersecciones, el número de carriles y la densidad de tráfico que soporten se utilizan unas u otras. En cualquier caso, el sistema de prioridades se establece por lotes, otorgando prioridad a un vehículo o grupo de vehículos en un momento, y al siguiente grupo a continuación.

El tráfico por lotes es el modelo de gestión principal en la práctica totalidad de los núcleos urbanos del planeta. En el momento en el que la densidad de tráfico se incrementa por encima de un determinado nivel, el tráfico por lotes se convierte en el responsable de buena parte de los problemas de congestión. Además, tiene otra característica de gran importancia, y es su influencia directa en el incremento del tiempo de los trayectos. En una intersección, cuando un lote de vehículos no tiene prioridad en detrimento de otro lote de vehículos, los iniciales se encuentran a la espera, detenidos. Posteriormente ocurrirá lo contrario. En definitiva, mientras unos circulan, los otros están parados. Estas detenciones se producen sistemáticamente en las diferentes intersecciones. Es el motivo principal de las bajas velocidades medias de desplazamiento dentro de los núcleos urbanos. Y cuanto menor es la velocidad media de desplazamiento, mayor tiempo tardas en llegar a tu destino.

La gestión automatizada del tráfico permite redefinir la gestión de las intersecciones, pasando de las intersecciones convencionales, gestionadas por reglas y señales analógicas, a las denominadas intersecciones inteligentes, gestionadas por software. Estas intersecciones inteligentes no necesitan ningún tipo de señal física, es la inteligencia de los propios ingenios y del sistema la que proporciona una solución segura y eficiente. Para su implementación es necesario un sistema de transporte automatizado. Se han realizado numerosas investigaciones en el ámbito de las intersecciones inteligentes vinculadas al desarrollo de esta tesis, analizando desde los casos más sencillos, como pueden ser soluciones basadas en autómatas celulares [214], [215], hasta las situaciones más complejas, mediante técnicas avanzadas de inteligencia artificial, como es la neuroevolución [216].

Utilizando este tipo de herramientas, la gestión automatizada del tráfico mediante los Centros de Control de Tráfico podrá gestionar las intersecciones inteligentes. Y estas intersecciones inteligentes son las que traen consigo el nuevo paradigma de navegación, el tráfico de flujos. Su implementación tendrá un impacto directo en la utilidad de las infraestructuras convencionales, así como en su optimización. La tendencia tradicional para remediar los problemas de congestión, al tiempo que ha crecido enormemente el parque móvil, ha sido hacer más calles y carreteras para satisfacer este incremento en la demanda.

Se ha realizado un estudio de un caso práctico para analizar el impacto real de estas intersecciones inteligentes en tráfico. Para ello se ha realizado una simulación mediante la herramienta CGN de gestión del tráfico autónomo de DROTIUM, puesta a disposición de esta tesis doctoral. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 9. 1.

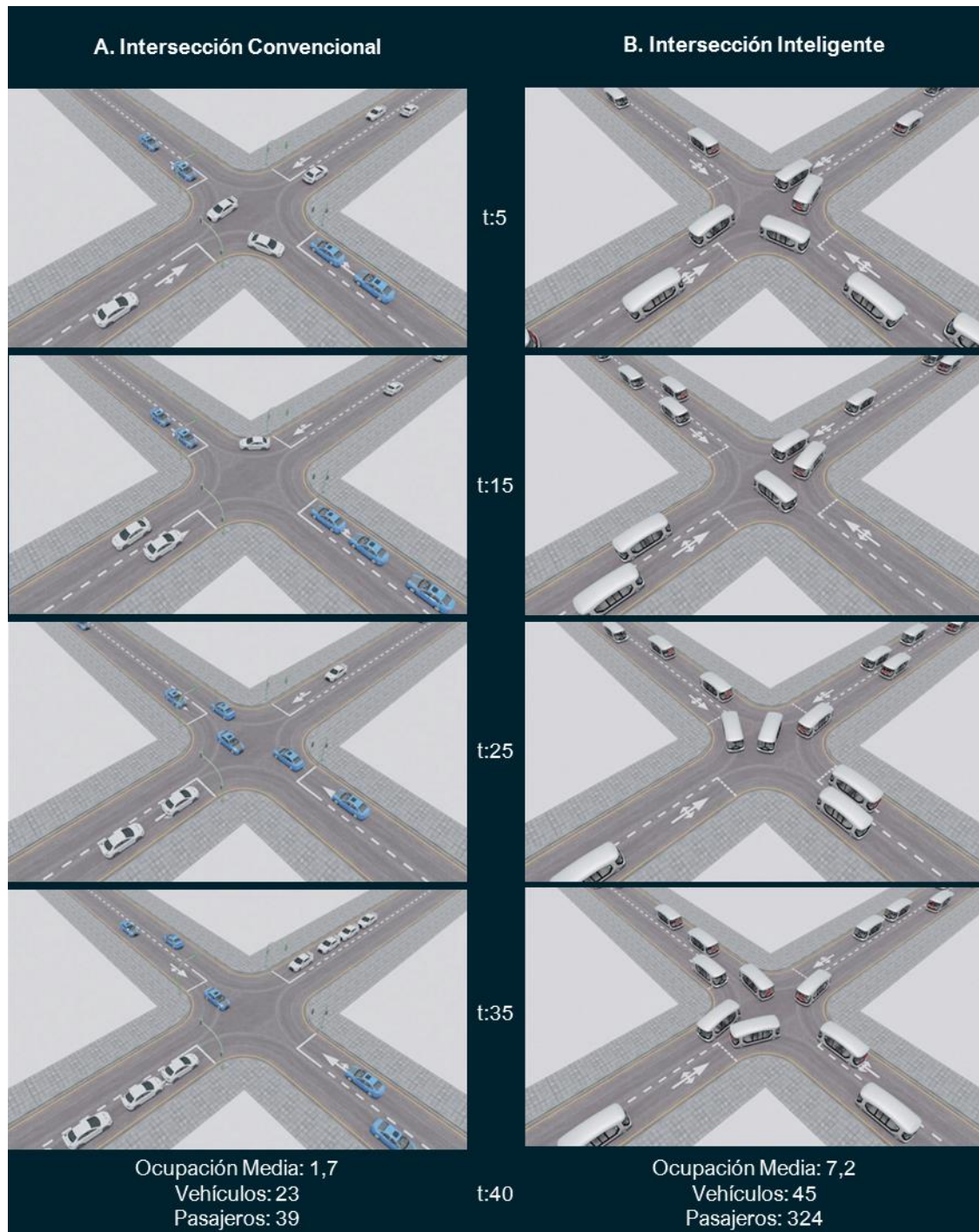


Figura 9. 1. Comparación de capacidad de gestión de una intersección convencional y una intersección inteligente del Sistema de Transporte Automatizado.

Un caso simple de estudio, una intersección perpendicular con 4 carriles de sentidos opuestos, que representa una de las intersecciones más frecuentes en la mayoría de ciudades del mundo. La simulación se ha realizado para un tiempo de 40 segundos. En el escenario A, una intersección convencional, el tráfico está organizado en 2 lotes de vehículos, los cuales tienen un tiempo de 20 segundos en espera y 20 segundos en movimiento. La ocupación media utilizada de 1,7 pasajeros es la media actual en el país. En el escenario B, una intersección inteligente con el sistema de transporte automatizado, se caracteriza por no tener señales analógicas ni semáforos, donde un CCT gestiona el

tráfico de flujos continuos. Al tratarse de un entorno urbano, y en base a los datos obtenidos en los capítulos anteriores, se han utilizado ingenios de 12 plazas, pertenecientes al grupo de ingenios que se prevén mayoritarios en entornos urbanos, con una ocupación media estimada de 7,2 pasajeros.

Los resultados obtenidos son muy reveladores. En el tiempo de estudio, la intersección convencional habría sido capaz de despachar un total de 23 vehículos, mientras que la intersección inteligente habría sido capaz de gestionar 45 ingenios, lo cual representa duplicar la capacidad. Sin embargo, el dato más importante es el de pasajeros, mientras que la intersección convencional habría despachado 39 pasajeros, la intersección inteligente habría gestionado en el mismo tiempo 324. Esto representa multiplicar prácticamente por 10 la capacidad de esa intersección. Es importantísimo darse cuenta que se trata de la misma infraestructura física, la misma intersección. Añadiendo la capa de inteligencia necesaria a las infraestructuras existentes, se podría llegar a incrementar en un orden de magnitud la capacidad real de gestión de personas y mercancías de las mismas. Esto supone un cambio radical respecto a la creencia de que para despachar más vehículos se necesitan más carreteras.

A pesar de que en la simulación realizada no se ha utilizado un escenario de alta densidad de tráfico, sino que se ha utilizado un supuesto de densidad media, las capacidades de estos sistemas inteligentes permitirán incluso incrementar las densidades de tráfico sin perjudicar la eficiencia. Pero no es un caso de especial interés. Se ha comprobado la potencialidad para multiplicar por 10 la capacidad de gestión de las intersecciones, lo cual contribuirá a eliminar la congestión y alcanzar niveles óptimos de eficiencia. Significa también un margen importante respecto a la tendencia de que las personas (y mercancías) cada vez se muevan más. Pero también significa que con muchos menos ingenios sobre las calles se podrá satisfacer la demanda de movilidad holgadamente, con todas las connotaciones y repercusiones que tendrá esta reducción del parque móvil.

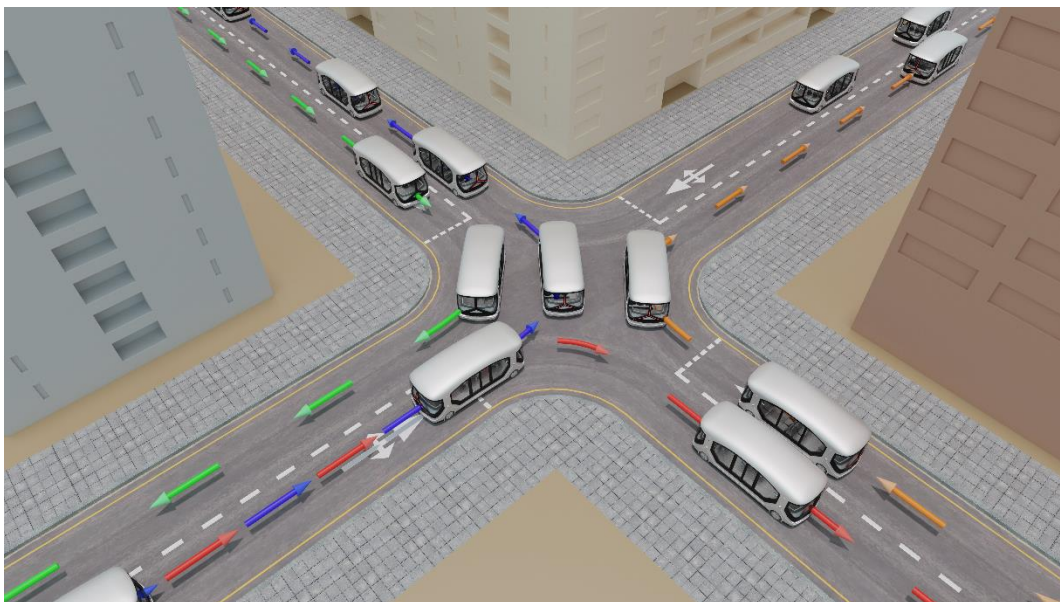


Figura 9. 2. Tráfico de flujos en una intersección inteligente del Sistema de Transporte Automatizado.

El paso del tráfico por lotes actual al tráfico de flujos que posibilita el sistema de transporte automatizado es una de las cualidades con mayor importancia en la consecución de la eficiencia deseada en el tráfico.



9.5. Triple Click para la Gestión de Emergencias

En la automatización del transporte de una nación la gestión de preferencias es una cuestión esencial. El concepto Triple Click (véase apartado 5.1.2.4) es la herramienta de la gestión automatizada del tráfico que permite la gestión de preferencias entre ingenios de diferentes ámbitos, como son civiles, policiales y militares, incluyendo también cualquier tipo de emergencias.

Ante una situación de emergencia, los ingenios destinados a tal fin deben recibir un tratamiento especial porque tienen la necesidad de moverse rápidamente hasta el lugar donde se produce la emergencia

Actualmente los vehículos de emergencias, como son policía, bomberos y ambulancias principalmente, tienen preferencia en la circulación, pudiendo infringir las leyes de tráfico, ignorar semáforos o señales de stop, y además el resto de conductores deben cederles el paso. Así está recogido en los reglamentos de circulación. La preferencia en la circulación se produce únicamente cuando se desplazan porque existe una emergencia, y esta eventualidad se notifica al resto de conductores mediante señales lumínicas (luces) y sonoras (sirenas).

Estas situaciones inducen mayor desconcierto y confusión en un tráfico de por sí ya caótico. A pesar de la alta especialización y entrenamiento de los conductores de este tipo de vehículos, los pasajeros de los vehículos de emergencia tienen una mayor posibilidad de verse involucrados en un accidente. En el estado de Iowa (EEUU), entre los años 2005 y 2013, 2.934 vehículos de emergencia tuvieron accidentes. Un estudio reveló que 1.184 de esos accidentes se produjeron mientras el vehículo circulaba hacia la emergencia, siendo las principales causas de accidentes el exceso de velocidad, saltarse las señales de tráfico y fallos en el seguimiento de la ruta adecuada. Frecuentemente estos accidentes tuvieron lugar cuando otros conductores no se dieron cuenta de la presencia de un vehículo de emergencias, incluso cuando utilizaban señales de alerta [217]. Se han realizado numerosas investigaciones y publicado patentes en relación a la mejora de este tipo de alertas, desde las tradicionales señales lumínicas rotatorias o sirenas, hasta métodos de laser o alertas de radio [218], pero el problema sigue existiendo.

El sistema de transporte automatizado está diseñado para integrar estas situaciones, y, por tanto, eliminar esta problemática. Recordemos que el principio operativo de la gestión automatizada del tráfico es proporcionar la ruta óptima para cada ingenio, en función del tipo de misión que realicen. Ocurre lo mismo en las situaciones de emergencia. Si bien en la mayoría de rutas que se producen llegar al destino en el menor tiempo posible es un factor importante pero no el único, debido a que se busca el beneficio en el conjunto del tráfico, en las situaciones de emergencia el factor crítico es la llegada a destino en el menor tiempo posible. Este criterio en el despacho de rutas tendrá un peso muy importante en las emergencias. Sin embargo, las emergencias se caracterizan por no estar previstas con antelación, y requieren de una respuesta que podrá afectar al desarrollo de las rutas de cientos de ingenios en circulación.

Se ha realizado una simulación comparando el movimiento de un vehículo de emergencias convencional en una vía con alta densidad de tráfico con el movimiento de un ingenio de emergencias en el sistema de transporte automatizado bajo las mismas circunstancias.

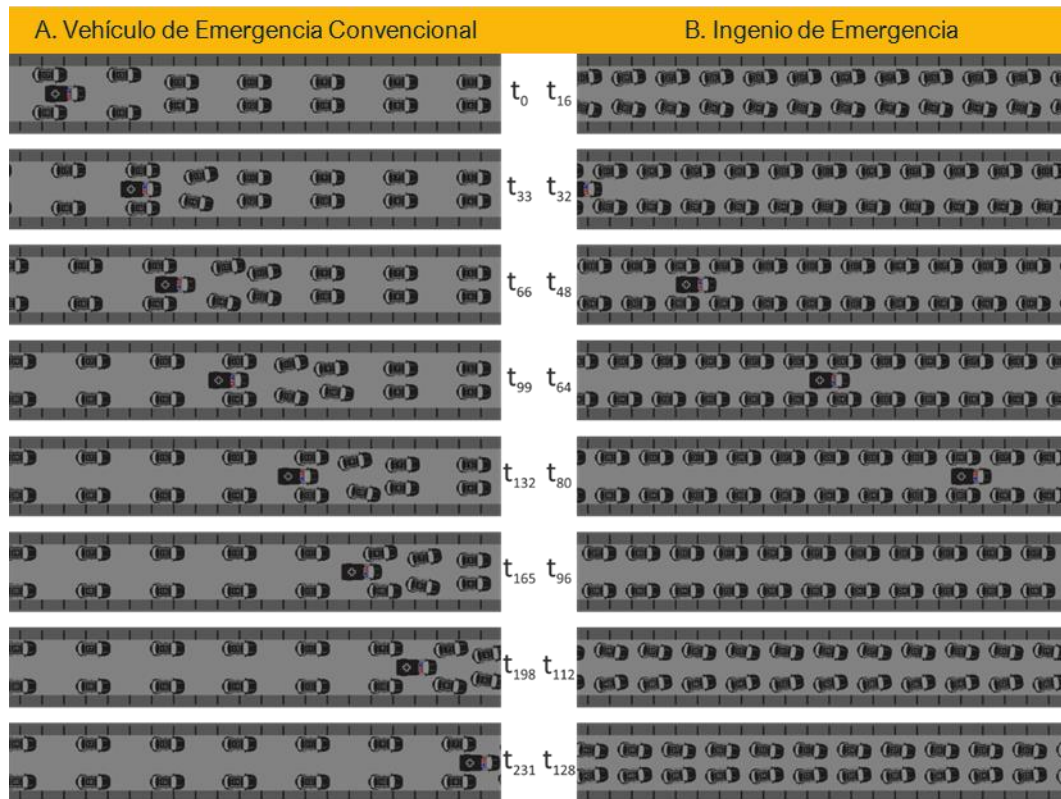


Figura 9. 3. Comparación del movimiento de un vehículo de emergencia convencional con un ingenio de emergencia en el Sistema de Transporte Automatizado

Como se observa en la Figura 9. 3, a lo largo de los diferentes instantes de tiempo analizados, el ingenio de emergencias necesita de aproximadamente la mitad de tiempo para recorrer la misma distancia. Esto se podría traducir en llegar el doble de rápido al destino. La gestión automatizada del tráfico permite una respuesta coordinada del conjunto de ingenios que circulan por la misma vía que el ingenio de emergencias. Las reglas dinámicas del tráfico (apartado 9.3) permitirían generar un carril rápido en el centro de la vía para el tránsito del ingenio de emergencia. A la reducción notable del trayecto, debido a la comunicación y coordinación constantes con el resto de ingenios, que actuarán para facilitar el paso y no interrumpir la navegación del ingenio de emergencias, se podría sumar un incremento en la velocidad de estos ingenios si la situación así lo requiriese.

El tráfico automatizado se caracteriza por el paradigma de la gestión integral de las preferencias bajo el Triple Click. Este caso de estudio se puede extender al conjunto de situaciones de emergencia que se producen en situaciones cotidianas.

9.6. Movilidad Integral Bajo Demanda

El concepto de movilidad bajo demanda se ha popularizado en los últimos años, coincidiendo con la aparición de las nuevas tecnologías que permiten su implementación real. Sin embargo, el sistema de transporte automatizado permite alcanzar o proporcionar



una movilidad integral bajo demanda, en su concepto más amplio. Nos referimos a la posibilidad de ofrecer soluciones personalizadas en cuanto a los servicios ofrecidos, el diseño de ingenios específicos para cada misión, el dimensionamiento de flotas, la previsión anticipada de picos de movilidad, etc.

Un servicio convencional de movilidad bajo demanda se entiende como aquel en el que un usuario contrata un transporte puntual para ir desde un origen hasta un destino, fuera de la oferta común de transporte. La gestión automatizada del tráfico permite que estas situaciones o servicios puntuales se conviertan en sistemáticos. Es decir, que toda ruta que se realice pueda considerarse bajo demanda. Incluso en aquella oferta de transporte programada o rutinaria, se habrá diseñado y calculado en base a datos muy precisos de los comportamientos de movilidad de una determinada población.

La robotización generalizada de los procesos vinculados al transporte, en la que se elimina al conductor de la ecuación, permite redefinir los patrones de diseño de los ingenios. De esta forma se pueden lograr soluciones mejor adaptadas a las necesidades específicas de cada misión, tanto para el transporte de personas como de mercancías. Se trata de conseguir que en la gran mayoría de ocasiones el ingenio empleado esté concebido para la misión que va a desempeñar, dejando atrás situaciones en las que una furgoneta con capacidad para transportar 2 toneladas traslada un único paquete de 2 kg, o situaciones en las que un vehículo para 5 pasajeros únicamente transporta a uno, como ocurre en la inmensa mayoría de casos. Se puede interpretar por tanto la movilidad bajo demanda desde el punto de vista del asiento en vez del vehículo. En lugar de desplazar, ofrecer o contratar un ingenio, se utiliza un asiento por persona, o el equivalente en capacidad de mercancía transportada.

Este concepto extendido de movilidad bajo demanda se puede aplicar de la misma forma a todos los recursos asociados al desplazamiento de ingenios, que se optimizan en función de la misión. Un claro ejemplo es la energía necesaria para desplazar a los ingenios. Con toda la información que dispone la gestión automatizada del tráfico y el conocimiento que es capaz de generar en base a los datos disponibles, se puede alcanzar también la gestión energética bajo demanda, donde se utilice únicamente la necesaria.

9.7. Intermodalidad

El sistema de transporte automatizado se caracteriza por estar diseñado para gestionar de manera integral ingenios aéreos, terrestres y marinos. Un mismo sistema controla las rutas de diferentes modos de transporte. El beneficio más inmediato es la capacidad de proporcionar servicios intermodales.

En el sector del transporte de mercancías la intermodalidad tiene una gran importancia. El proceso logístico de transporte es muy complejo y requiere de numerosas etapas de viajes en diferentes ingenios. La gestión automatizada permitirá proporcionar rutas eficientes en la globalidad de los recorridos, minimizando los tiempos de espera y reduciendo al mismo tiempo los tiempos de entrega. Es un proceso que engloba el viaje completo de un producto, desde su origen hasta el reparto de última milla en destino, con independencia del número de ingenios que participen en la misión.



Aplicado al transporte de pasajeros cobra especial relevancia en trayectos medios o largos, a partir del momento que es necesario utilizar más de un ingenio para completar el recorrido global. Actualmente los viajes que tienen cambios de modo o trasbordos sufren una importante penalización de tiempo, además de suponer problemas de estrés y complicaciones añadidas a los usuarios. Si a la ecuación añadimos que los proveedores de estos servicios no pertenecen a la misma empresa, sino a distintas, esta problemática aumenta. En cambio, con un sistema de transporte automatizado, las rutas se calculan de principio a fin, considerando en su cálculo todas las posibles escalas y trasbordos necesarios, con independencia que esos servicios los ofrezcan diferentes operadores de flota. Se prioriza la eficiencia en el cálculo de las rutas de cada usuario. De esta forma se conseguirán eliminar tiempos muertos de espera en estaciones o intercambiadores. Se incrementará notablemente la calidad de los servicios y el confort de los usuarios en sus trayectos.

La intermodalidad también puede ser comprendida desde la perspectiva del transporte de personas y mercancías de manera combinada. Por poner un ejemplo muy común, los viajes de vacaciones, donde la gente lleva un equipaje voluminoso, que habitualmente es incómodo de portar. La gestión automatizada del tráfico permitirá disociar ambos transportes, las personas siguen una ruta que priorice su comodidad, sin preocuparse de cargar con maletas, mientras que el equipaje viaja en ingenios especializados en la movilidad de mercancías. El salto cualitativo que aporta la gestión automatizada del tráfico es el control absoluto del tráfico, permitiendo saber con precisión los tiempos de llegada a destino de unos y otros, y garantizando de esta manera que en el momento de llegada al destino los pasajeros tendrán allí su equipaje.

La integración de los diferentes modos de transporte, bajo un mismo sistema automatizado, permite gestionar la movilidad como un todo a nivel nacional, a diferencia del modelo actual que sufre una gran segmentación sectorial con las penalizaciones de calidad y eficiencia en los servicios de transporte.

9.8. Nueva estructura económica en el transporte

Económicamente el transporte actual está sostenido por lo que pagan los usuarios. Existen dos vías principales. En el transporte privado, la cantidad que abonan los usuarios por comprar un vehículo más el conjunto de impuestos, tasas y peajes que pagan por el uso de determinadas infraestructuras. En el transporte público, mediante la compra del billete para un vehículo que gestiona un operador de flotas, que es quien abona el resto de pagos.

En el nuevo modelo de movilidad, el transporte seguirá sostenido por los usuarios finales, pero cambia la estructura económica y surgen nuevos modelos de tarifas. El primer cambio significativo se produce en la forma de comprar un ingenio. Respecto al tradicional modelo de compra, en el que el usuario adquiere la propiedad de un vehículo, se produce una evolución hacia un modelo más similar al del transporte aéreo. La integración de los ingenios dentro de un sistema de transporte automatizado tiene una serie de características que afectan a su comercialización. La esencia al vender un ingenio estará en la comercialización de viajeros por kilómetro, o kilogramos por kilómetro en el caso de mercancías. De esta forma, el operador de flota o el propietario adquiere:



1. Derecho de uso del ingenio.
2. Derecho de actualización del ingenio.
3. Derecho de mantenimiento del ingenio.
4. Derecho de explotación del ingenio
5. Derecho de reposición del ingenio.

La utilización de los servicios que proporcionan los Centro de Control de Tráfico y la propia Red S3 también generará nuevas estructuras económicas. En el apartado 5.3.6 se describió el Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu) y la relevancia que tendría en la comercialización de estos servicios. Todo ingenio que navegue bajo el sistema de transporte automatizado tendrá que conectarse al EAMu, un espacio radioeléctrico, para poder disponer de los servicios del sistema. Para realizar esta conexión todos los ingenios tendrán que abonar una tasa, mensual o anualmente, que les permita incorporarse al EAMu. Es un procedimiento similar al que se realiza con la telefonía móvil, en la que todos los dispositivos pagan una tarifa a una operadora de telefonía para conectarse a su espacio radioeléctrico.

El desglose de esta tarifa se reparte entre los operadores de la Red S3 que gestionan esta infraestructura y tienen que amortizar su instalación, los gestores de los CCT con los costes de computación en la nube y la amortización de esta infraestructura, y los propietarios de los viales. Es en este último punto donde surge un nuevo modelo fiscal, de especial interés para las administraciones públicas. Las administraciones públicas son las propietarias de los viales (ayuntamientos, diputaciones, comunidades autónomas y el Estado respectivamente). Se generará una nueva fuente de ingresos pasivos, que les permitirá hacer frente al mantenimiento de las infraestructuras, tanto de las nuevas, como de las ya existentes, cuyo mantenimiento genera graves problemas económicos en la actualidad.

El coste de un ingenio, especialmente en las primeras etapas de la transición, se prevé que sea superior al de un vehículo convencional. De cara al propietario final, esto supone un desincentivo a la hora de dar el paso a la movilidad autónoma, resultando más factible para un operador de flotas. Pero como ya se ha expuesto en esta tesis, se prevé un cambio hacia un modelo en el que el transporte particular sea minoritario en comparación con los servicios de movilidad compartida. Esto es un hecho más a favor de esta tendencia.

El factor más importante es la eficiencia en el transporte. Al conseguir maximizar el uso de los ingenios en los servicios de movilidad compartida, tanto por tener en funcionamiento los ingenios el máximo tiempo diario posible (marcado principalmente por las demandas de movilidad diurnas) y consiguiendo unas tasas de ocupación media muy elevadas en comparación con las actuales, los operadores de flota distribuirán los costes de adquisición del ingenio y los costes operativos entre un gran número de usuarios. Este reparto permitirá reducir mucho la tarifa para el cliente final, es decir, el billete que paga por viajar. Se obtendrá un coste por kilómetro para el usuario final muy inferior al que tendría si decidiese adquirir en propiedad un ingenio. Unido al hecho de la movilidad total, es decir, que pueda viajar libremente a donde desee sin la necesidad de un ingenio propio, será un factor determinante en la consolidación de este cambio de modelo.



9.9. Recuperación de las ciudades para las personas

A lo largo de esta tesis se ha analizado el impacto que tendrá el sistema de transporte en el urbanismo. En el apartado 6.2.2.4 se destaca la importancia que tendrá en el ámbito jurídico la preservación de las ciudades como activo cívico, y en el apartado 8.2.2.12, se valora el impacto económico de la automatización del tráfico en el urbanismo. Las conclusiones al analizar estos dos apartados son evidentes, la implementación de un sistema de transporte automatizado tiene un impacto directo sobre la vida en las ciudades y, por lo tanto, en las personas.

La suma de los beneficios analizados en la tesis y, en especial, los presentados en este capítulo, permiten intuir el impacto sobre las ciudades. Transformar un sistema de transporte inseguro en seguro, insostenible en sostenible e ineficiente en eficiente significa una reinterpretación total de la movilidad. Recurriendo al planteamiento teórico expuesto en el apartado 3.4, la automatización del tráfico representa el diseño de un nuevo modelo de movilidad. Y en este nuevo diseño, el urbanismo juega un papel destacado.

La consecución de un sistema de movilidad eficiente es el factor con un mayor impacto en la planificación urbanística de las ciudades. La optimización de los flujos de tráfico significa una considerable reducción del número de ingenios necesarios, descongestionando notablemente la cantidad de ingenios que navegan de manera simultánea, y pudiendo incluso reducir el número de carriles o viales necesarios. Otra cuestión muy relevante es la desaparición de cientos de miles de aparcamientos, con la liberación de todo el espacio que ocupan, que se podrá destinar a otros fines. Además, aparecerán otras necesidades vinculadas a la nueva movilidad, como pueden ser centros logísticos para el reparto de mercancías de última milla, intercambiadores modales, o la adaptación de las viviendas para la recepción de mercancías por tierra o aire. En definitiva, se puede plantear el diseño de nuevas ciudades adaptadas al nuevo modelo de movilidad.

El argumento de fondo en este cambio de diseño de ciudad se puede resumir en el siguiente concepto: la recuperación de las ciudades para las personas. El nuevo modelo, con el sistema de transporte automatizado, permite interpretar la movilidad como un suministro más de la ciudad. Desaparece la necesidad de pensar las ciudades para los coches debido a la gran cantidad de ellos, dando lugar a un sistema que se adapta y ajusta a la demanda real de movilidad de cada ciudad, con una solución de movilidad precisa, sin sobredimensionamientos. De esta forma, se permite dar el salto a la inversa en comparación con la irrupción de los automóviles hace más de un siglo. Se conciben las ciudades para las personas de nuevo, como un gran activo cívico.



10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

10.1. Conclusiones

Décadas de investigación en el campo de la navegación autónoma han dado lugar a un nivel de desarrollo tecnológico que permite la utilización de estos vehículos autónomos en numerosas aplicaciones, pero, sobre todo, se ha demostrado su potencial real para reemplazar a los conductores, pilotos o timoneles. El potencial que tienen estos nuevos ingenios para solucionar los graves problemas del actual sistema de transporte, siendo los principales la contaminación, los accidentes y la congestión, sienta las bases de una gran revolución en la movilidad, alumbrando una nueva era del transporte.

La entrada en el mercado y su crecimiento exponencial darán lugar a escenarios con un elevado número de vehículos autónomos en circulación, que plantean cuestiones muy importantes, más allá del objetivo convencional de alcanzar el nivel completo de autonomía para un vehículo. El problema a resolver es la automatización integral del tráfico. Los enfoques de los marcos o estándares de referencia existentes, para vehículos autónomos terrestres, aéreos o marinos, se limitan a la automatización completa de un vehículo. El estudio realizado en esta tesis concluye que asumir los estándares convencionales, bajo el supuesto de que se automatiza un vehículo cientos o miles de veces, genera nuevos problemas y deja cuestiones sin resolver. Por lo tanto, no es un modelo aconsejable. La automatización del tráfico necesita un nuevo marco de referencia, concebido y diseñado para tal fin.

En esta tesis se ha presentado el diseño conceptual de un sistema de transporte automatizado que permite la automatización integral del tráfico a escala nacional, con carácter intermodal para ingenios terrestre, aéreos y marinos, bajo los criterios de robustez y seguridad, permitiendo la generación de estándares y marcos de referencia comunes. El sistema tiene una infraestructura compuesta por tres elementos principales: la gestión automatizada del tráfico, una red de comunicaciones y los ingenios.

La gestión automatizada del tráfico es una de las claves del sistema, responsable de garantizar la eficiencia del tráfico y capaz de incrementar los niveles de seguridad. Entre sus numerosas funcionalidades destacan algunas como la planificación y gestión de rutas, el control, la gestión y monitorización de ingenios, los atributos de autoridad o la gestión de preferencias. Una de sus características más novedosa es que proporciona nuevos títulos jurídicos, como es el Triple Click que resuelve la integración de misiones de carácter civil, policial y militar, o el Tercero Autorizado, que permite ejecutar aquellas misiones de intervención de un ingenio amparadas por la ley. Esta gestión automatizada del tráfico se realiza en los Centros de Control del Tráfico, una infraestructura formada por Centros de Procesamiento de Datos y Salas de Control de Tráfico, presentando una arquitectura distribuida que permite una gestión centralizada. De entre los procesos descritos, la competencia más relevante que se le atribuye a los CCT es el cálculo y asignación de todas las rutas que realizan los ingenios bajo su tutela. Esto representa un avance significativo respecto a las técnicas convencionales de gestión del tráfico, afectando de lleno al diseño del propio sistema autónomo de los ingenios.



Los ingenios son máquinas muy complejas, que presentan tipologías muy diferentes, dependiendo del medio por el que navegan o el tipo de misión que realizan. La investigación de esta tesis doctoral se ha centrado en el diseño del sistema autónomo, un sistema genérico para cualquier ingenio que se integre en el sistema de transporte automatizado. Se presenta un sistema autónomo formado por ocho subsistemas principales. El propósito principal es dotar al sistema autónomo de la situación de conciencia que le permita obtener un conocimiento preciso del estado de su entorno, y tomar las decisiones de navegación en base a una información precisa y fiable. A diferencia de las investigaciones y desarrollos realizados hasta la fecha, este sistema autónomo presentado se caracteriza por estar integrado en un sistema global, lo cual significa que existe una estructura de competencias distribuidas. De manera simplificada o resumida, se puede establecer que el sistema autónomo del ingenio tiene la competencia de las decisiones a corto plazo. Las decisiones a medio y largo plazo, es decir, la planificación de rutas, se las cede al Centro de Control del Tráfico.

Las interacciones entre estos dos elementos del sistema, los CCT y los ingenios son constantes y se realizan de manera continuada, motivo por el que la red de comunicaciones es imprescindible. Analizando las redes actuales de comunicaciones y valorando los requisitos del sistema de transporte automatizado, se llegó a la conclusión de que es necesario desarrollar una red dedicada exclusivamente al transporte. Las misiones principales de esta red de comunicaciones o Red S3 son: garantizar las comunicaciones entre los diferentes elementos y obtener la posición de ingenios que navegan de manera autónoma. Al igual que ocurre con el CCT, de entre las competencias de la Red S3 también se deducen nuevos títulos jurídicos, como es el Segundo Testimonio, que permite certificar desde un segundo observador la posición de los ingenios. La red de comunicaciones posibilita las comunicaciones de unos ingenios con otros (I2I), y las comunicaciones de los ingenios con la infraestructura y el CCT (I2X). Esta arquitectura permite integrar un nuevo sistema de posicionamiento local (LPS) de tipología asíncrona e inversa, que proporcione la ubicación tridimensional de los ingenios con una exactitud sub-métrica, adaptada a las necesidades globales del sistema de transporte automatizado. La estructura general de la Red S3 se compone por una red de geobalizas y sensores que, sin perjuicio de las dos funciones principales, posibilita la prestación de una serie de servicios complementarios.

Combinando el funcionamiento de los elementos principales del sistema de transporte automatizado se consigue la generación del denominado Espacio Automatizado Multicontexto (EAMu), un nuevo concepto propuesto en esta tesis. El EAMu destaca desde el punto de vista operativo, porque permite la monitorización en tiempo real para la gestión automatizada del tráfico. Y desde el punto de vista económico, destaca porque permite la comercialización de los diferentes servicios proporcionados por la infraestructura del sistema de transporte automatizado.

Automatizar el tráfico de un país, en este caso España, tiene profundas implicaciones legislativas. Se han identificado tres etapas principales en un complejo proceso legislativo que son: la etapa de experimentación, la de transición legislativa y la de consolidación legislativa. En cada una de ellas se han de abordar cuestiones de gran calado económico y social, que darán lugar a profundos cambios en la estructura administrativa y regulatoria vinculada al transporte. Al mismo tiempo se han expuesto los cuatro paradigmas principales que definen la regulación de esta nueva era del transporte, que son: la movilidad es un



derecho civil, la no neutralidad tecnológica, la generación de una Nube Soberana y la preservación de las ciudades como activos cívicos.

Los resultados obtenidos en el estudio de implementación de este sistema de transporte automatizado en una ciudad, realizado con los datos reales de movilidad de una población concreta, son muy reveladores. En una situación ideal, se consigue reducir el parque móvil en un 94%, para ofrecer la misma demanda de movilidad existente en la actualidad. No solo destaca la drástica reducción, sino también su composición. Mientras que en la actualidad el 79,2% son turismos (vehículos de 5 plazas), en el nuevo modelo el 62,97% de los ingenios tienen entre 8 y 12 plazas. La ocupación media de los ingenios se incrementa del 25,2% de la actualidad a un 61,67%. La velocidad media de circulación en la ciudad pasa de 11,62 a 19,7 km/h.

Se deduce de los datos obtenidos la magnitud del impacto real que tendrá la automatización del tráfico, y se ha contrastado mediante el estudio del impacto económico que tendrá en España. Se han analizado los sectores que sufrirán un impacto directo, representando en conjunto el 38,16% del PIB del país. En algunos de ellos el impacto es muy positivo, mientras que en otros el impacto es muy negativo. En cuanto a magnitud de impacto, destacan dos sectores en especial. Primero la industria de la automoción, que se verá gravemente lastrada por la reducción enorme del parque móvil, estimada alrededor de un 70% a nivel nacional, una vez completada la transición. Y segundo, el sector de los combustibles fósiles, donde se prevé una reducción de hasta el 98% debido al cambio hacia energías renovables. Son dos sectores muy importantes en la economía nacional, que además generan una gran dependencia en otros sectores, y se enfrentan a un gran problema. Por el contrario, aquellos sectores vinculados al nuevo modelo de movilidad, presentan unas grandes expectativas de crecimiento y generación de riqueza.

Las ventajas y beneficios de la implementación de este sistema de transporte automatizado son muy importantes y numerosos. Permite conseguir una movilidad sostenible, segura y eficiente. Da lugar a la redefinición de los actuales patrones de movilidad y la generación de unas nuevas reglas del tráfico, adaptadas a ingenios inteligentes, en lugar de al comportamiento de las personas. Se posibilita el cambio del tráfico por lotes al tráfico de flujos, elevando la eficiencia a otro nivel, e incrementando la capacidad de las infraestructuras actuales. Se consigue una optimización importante en todos los servicios de emergencia. Permite la integración intermodal de diferentes ingenios. Se alumbran nuevos modelos de negocio, de especial interés tanto para el sector privado como para el sector público. En definitiva, se favorece la calidad de vida de las personas, consiguiendo que la movilidad no represente un problema y sea una solución.

Las implicaciones y consecuencias que tiene la automatización del tráfico de un país son del mismo orden de magnitud que la complejidad del reto, elevadísimas. En primer lugar, tecnológicas y científicas, seguidamente legislativas, y finalmente económicas y sociales. Se concluye argumentando que es necesario realizar una planificación estratégica de carácter global para la automatización del tráfico del país. Ante una revolución de estas dimensiones, las oportunidades son muchas, pero también lo son los riesgos y amenazas. Sería conveniente una actitud proactiva, y la involucración urgente de las administraciones e instituciones con competencias en materia de transporte para realizar un plan estratégico nacional que facilite la automatización del transporte en España. La inacción o demora prolongada en esta planificación, no solamente podría suponer perder grandes oportunidades, sino que podría traducirse en importantes dramas socioeconómicos. Se



pretende que esta tesis doctoral sirva como punto de partida. En ella se ha explicado lo que significa automatizar el transporte de un país, y se han propuesto las primeras líneas de actuación.

10.2. Líneas futuras

El modelo teórico presentado en esta tesis doctoral crea un marco conceptual que permite realizar una formalización detallada en diferentes áreas de conocimiento para una posterior implementación práctica, con el fin último de automatizar el tráfico. Los trabajos futuros son muy amplios en los diversos campos afectados.

El trabajo de investigación en las áreas tecnológicas que componen el sistema de transporte automatizado es importante. La gestión automatizada del tráfico es un campo emergente que requiere del desarrollo de numerosos algoritmos, herramientas, procesos y arquitecturas nuevas. La red de comunicaciones plantea retos muy serios en campos como la gestión y transmisión de gran cantidad de datos, con necesidades de mínima latencia, o la generación de una nueva arquitectura de posicionamiento local. El desarrollo de sistemas autónomos para los ingenios supone un incremento en la complejidad de los procesos internos que han de resolver para su correcta integración en el sistema. La ciberseguridad es una disciplina transversal imprescindible para garantizar la seguridad. Toda esta actividad investigadora dará lugar a numerosas tesis doctorales, como las ya citadas. También se beneficiará la investigación en el ámbito de la industria privada, debido a las importantes inversiones que se están realizando en este sector, que está teniendo un tremendo auge y está siendo considerado como estratégico por las principales potencias mundiales.

El campo jurídico también necesita desarrollar trabajos de investigación específicos en diversas áreas. Es necesario abordar cuestiones como la creación de nuevas leyes de ámbito nacional, regional y local, la organización administrativa del transporte, el reparto y reestructuración de competencias, la generación de nuevos títulos jurídicos, el encaje legislativo de los nuevos paradigmas de la movilidad automatizada, o la revisión de derechos fundamentales, como la libre circulación o la movilidad universal, entre muchas otras.

Las conclusiones obtenidas tanto en el estudio de impacto en la movilidad con un sistema automatizado del tráfico, como el impacto económico en la economía nacional en base a indicadores macroeconómicos, invitan a realizar estudios de carácter global a un mayor número de poblaciones para evaluar el impacto de la automatización del tráfico en áreas metropolitanas de diferentes tamaños, e incluso en las zonas rurales despobladas. De igual modo, resultará de especial interés realizar estudios económicos especializados en los diferentes sectores afectados de manera directa por esta revolución en el transporte, con el objetivo de poder identificar nuevas oportunidades y encontrar salidas a aquellos cuyo futuro pinta más negro.

Desde una perspectiva genérica, los principales objetivos de investigación derivados de esta tesis se pueden agrupar en fases, que incluyen el conjunto de áreas de conocimiento afectadas, tratando la automatización del tráfico como un proyecto multidisciplinar.



1. Diseño detallado. Iniciando el trabajo a partir del modelo conceptual del sistema de transporte automatizado presentado en esta tesis, el siguiente paso es proceder con las fases de diseño preliminar y diseño de detalle de los diferentes elementos que forman el sistema, con el objetivo de crear un proyecto piloto o demostrador. En cada una de las áreas se requiere de una importante actividad de investigación para resolver cuestiones técnicas, y un proceso de formalización en los procesos y arquitecturas de un sistema que presenta elevado grado de complejidad, y la realización de numerosas simulaciones que permitan anticipar el comportamiento de los elementos antes de su materialización.
2. Creación del proyecto piloto. Superada la fase teórica, el siguiente paso es la creación de un demostrador que permita obtener datos del comportamiento del sistema de transporte automatizado. El enfoque debería incluir un circuito de pruebas privado o particular, cerrado al tráfico convencional, que sirva como banco de pruebas y ensayos para ingenios completamente autónomos. El circuito incluirá un Centro de Control de Tráfico experimental, se tecnificarán los viales con una red de comunicaciones modulable y escalable en capacidad y servicios y, por supuesto, contará con un mínimo de dos ingenios autónomos en una primera etapa. Posteriormente se deberá incrementar el número de ingenios en el circuito para estudiar y evaluar el comportamiento de los flujos de tráfico.
3. Experimentación real. La experimentación en escenarios reales es una fase fundamental. El estudio de las capacidades completas del sistema de transporte automatizado es incompatible con la convivencia con el tráfico convencional. Es un sistema diseñado para ingenios que están controlados por un sistema autónomo de altas capacidades, un computador. La implementación en escenarios reales en los que se conviva con tráfico convencional supondrá limitar las capacidades del sistema, si bien también es una etapa necesaria. Al mismo tiempo, será necesario acotar lugares específicos para la implementación del sistema, como puede ser un barrio de una ciudad, complejos o urbanizaciones privadas, o incluso la creación de ciudades específicas.
4. Certificación. Culminadas con éxito las fases anteriores, el proceso de validación del sistema y la certificación de los diferentes componentes y elementos es un hito imprescindible para su despliegue con fines comerciales. La certificación tiene un nivel de complejidad equivalente al del reto tecnológico y científico que supone automatizar el tráfico. La cantidad de disciplinas afectadas es muy amplia, incluyendo áreas como la algoritmia de gestión del tráfico, técnicas de inteligencia artificial, las telecomunicaciones, la ciberseguridad, entre otras.

Una vez que hayan concluido las diferentes fases de este proceso, se podrá implementar el sistema automatizado de transporte con fines comerciales. Es importante discernir entre la conducción autónoma convencional y el sistema de transporte automatizado. Durante la transición seguirán caminos diferentes, debido a los distintos requerimientos que tiene cada uno. Serán caminos complementarios, que podrán convivir sin ningún tipo de problema. Si bien en las primeras fases de la transición, la conducción autónoma convencional destacará por la convivencia con el tráfico convencional, en las etapas más avanzadas de la transición, en escenarios con una elevada cantidad de ingenios autónomos, el sistema de transporte automatizado mostrará su verdadero potencial.

Cuando asumes que el parque móvil se reemplazará por vehículos autónomos, la cuestión de fondo que se plantea es la automatización del tráfico. Es un debate, de momento ajeno



a la sociedad, pero que las élites y dirigentes de los diferentes países deberían empezar a planificar, y definir estrategias detalladas para optimizar los billones de euros que se van a invertir en movilidad en los próximos años. El trabajo por hacer es mucho y complejo. La investigación realizada y presentada en esta tesis intenta mostrar el camino para conseguirlo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Health Organization, “Burden of disease from household air pollution for 2012. Summary of results,” 2014.
- [2] European Environment Agency, “Air quality in Europe - 2018 report,” Copenhagen, 2018.
- [3] European Environment Agency, “Air quality and COVID-19,” 07 May, 2020. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-and-covid19>. [Accessed: 15-May-2020].
- [4] Organización Mundial de la Salud, “Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013,” Ginebra, 2013.
- [5] National Highway Traffic Safety Administration, “National Motor Vehicle Crash Causation Survey: Report to Congress,” Springfield, Virginia, 2008.
- [6] National Safety Council, “Injury Facts - Motor Vehicle,” *Injury Facts*, 2018. [Online]. Available: <https://injuryfacts.nsc.org/motor-vehicle/overview/introduction/>. [Accessed: 19-May-2020].
- [7] National Highway Traffic Safety Administration, “2018 Fatal Motor Vehicle Crashes: Overview,” Washington DC, 2019.
- [8] Dirección General de Tráfico, “Anuario Estadístico de Accidentes 2018,” Madrid, España, 2018.
- [9] Dirección General de Tráfico, “Las principales cifras de la Siniestralidad Vial España 2016,” Madrid, España, 2016.
- [10] INRIX, “Global Traffic Scorecard,” Kirkland, WA, 2019.
- [11] Organización Internacional de Constructores de Automóviles, “Production Statistics,” *Production Statistics*, 2019. .
- [12] Instituto Nacional de Estadística, “Cifras de Población,” 2019. .
- [13] Dirección General de Tráfico, “Parque Móvil España 2018,” *Series Históricas*, 2018. .
- [14] International Museum of the Horse, “What we theorize - When and where domestication occurred,” 2016. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20160719000140/http://www.imh.org/exhibits/online/what-we-theorize-when-and-where-domestication-occurred>. [Accessed: 23-Oct-2020].
- [15] J. Herbst, *The History of Transportation*. Minneapolis, MN, USA: Lerner Publishing Group, 2006.
- [16] V.Sorio, “Breve Historia de las Carreteras,” *Rev. Obras Públicas*, pp. 27–38, 1987.
- [17] B. Spear, “James Watt: The steam engine and the commercialization of patents,” *World Pat. Inf.*, vol. 30, no. 1, pp. 53–58, 2008.



- [18] R. Hernández, "Aspectos propulsivos de ingenio de Blasco de Garay," in *I Simposio de Historia de las Técnicas. La construcción Naval y la Navegación*, 1995, pp. 166–180.
- [19] L. C. Hunter, "The Invention of the Western Steamboat," *J. Econ. Hist.*, vol. 3, no. 2, pp. 201–220, 1943.
- [20] Hemeroteca ABC, "España, Precursora de la Navegación Submarina," *ABC Madrid 07-03-1980*, 1980. [Online]. Available: <https://www.abc.es/archivo/periodicos/abc-madrid-19800307-89.html>. [Accessed: 30-Oct-2020].
- [21] G. Tierie, *Cornelis drebbel*. Gedigitaliseerd door Francis Franck, 1932.
- [22] J. Coggins, *Ships and Seamen of the American Revolution*. Courier Corporation, 2002.
- [23] J. Pike, "Submarine History - The New Navy," 2011. [Online]. Available: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/sub-history4.htm>. [Accessed: 30-Oct-2020].
- [24] US Navy Submarine Force Museum, "History Of USS NAUTILUS," 2019. [Online]. Available: <https://www.usnautilus.org/history-of-uss-nautilus/>. [Accessed: 30-Oct-2020].
- [25] M. J. T. Lewis, "Railways in the Greek and Roman World," in *Early railways: a selection of papers from the First International Early Railways Conference*, 2001, pp. 8–19.
- [26] K. Gibbs, *The Steam Locomotive: An Engineering History*. Amberly Publishing, 2012.
- [27] Curious Expeditions, "A brief note on Ferdinand Verbiest," 2013. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20130310071024/http://www.curiousexpeditions.org/?p=52>. [Accessed: 03-Nov-2020].
- [28] SIA - Société des Ingénieurs de l'Automobile, "Le Fardier de Cugnot," 1989. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20080416231439/http://www.ile-de-france.drivre.gouv.fr/vehicules/homolo/cnrv/histoire.htm>. [Accessed: 03-Nov-2020].
- [29] Automuseum Dr. Carl Benz, "Historia de Carl Benz," *En la histórica fábrica de Benz*, 2018. [Online]. Available: <https://www.automuseum-dr-carl-benz.de/historie.html>. [Accessed: 03-Nov-2020].
- [30] J. Ziegler, P. Bender, M. Schreiber, and others, "Making Bertha Drive - An Autonomous Journey on a Historic Route," *Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 8–20, 2014.
- [31] C. W. Wells, *Car Country: An Environmental History*. University of Washington Press, 2013.
- [32] R. V. V. Petrescu *et al.*, "History of Aviation-A Short Review," *J. Aircr. Spacecr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–49, 2017.
- [33] C. Lázaro, *Breve Historia de los Dirigibles*. Ediciones nowtilus SL, 2016.
- [34] F. I. Petrescu and R. V. Petrescu, *The Aviation History*, no. October 2015. Books on Demand GmbH, 2012.
- [35] A. Napoleon, *Santos-Dumont y la conquista del aire*. Brasiliana, 1957.



- [36] A. Brown, "Chuck Yeager Recounts His Test Pilot Career for NASA Dryden Staff," *NASA Dryden Flight Research Center*, 2007. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/Features/2007/yeagerRecounts.html>. [Accessed: 29-Oct-2020].
- [37] A. Martos, *Breve historia de la carrera espacial*. Madrid: Ediciones Nowtilus S.L., 2009.
- [38] E. D. Dickmanns, B. Mysliwetz, and T. Christians, "An Integrated Spatio-Temporal Approach to Automatic Visual Guidance of Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 6, pp. 1273–1284, 1990.
- [39] E. D. Dickmanns *et al.*, "Seeing passenger car 'VaMoRs-P'," *Intell. Veh. Symp. Proc.*, pp. 68–73, 1994.
- [40] U. Franke, S. Mehring, A. Suissa, and S. Hahn, "Daimler-Benz steering assistant - a spin-off from autonomous driving," *Intell. Veh. Symp. Proc.*, pp. 120–124, 1994.
- [41] D. Pomerleau and T. Jochem, "Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering," *IEEE Expert Intell. Syst. Their Appl.*, pp. 19–27, 1996.
- [42] G. Seetharaman, A. Lakhota, and E. P. Blasch, "Unmanned Vehicles Come of age: The DARPA Grand Challenge," *IEEE Comput. Soc.*, no. 756, pp. 26–29, 2006.
- [43] S. Thrun *et al.*, "Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge," *J. F. Robot.*, vol. 23, no. 9, pp. 661–692, 2006.
- [44] J. E. Naranjo *et al.*, "Autopia architecture for automatic driving and maneuvering," *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, pp. 1220–1225, 2006.
- [45] C. Urmson *et al.*, "Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge," *J. F. Robot.*, vol. 25, no. 8, pp. 425–466, 2008.
- [46] Waymo, "Millions of miles driven," 2018. [Online]. Available: <https://waymo.com/ontheroad/>. [Accessed: 17-Apr-2018].
- [47] B. Zimmer, "The Flight of 'Drone' From Bees to Planes," *The Wall Street Journal*, 2013. [Online]. Available: <https://www.wsj.com/articles/SB10001424127887324110404578625803736954968#:~:text=Around the same time%2C%22drone,of a bee's persistent hum.&text=%22Fahrney adopted the name 'drone,Zaloga wrote.> [Accessed: 20-Oct-2020].
- [48] V. Prisacariu, "The History And The Evolution Of UAVs From The Beginning Till The 70s," *J. Def. Resour. Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 181–189, 2017.
- [49] M. E. Rosheim, *Leonardo's Lost Robots*. Germany: Springer, 2006.
- [50] P. G. Fahlstrom and T. J. Gleason, *Introduction to UAV Systems*, Fourth Edi. Wiley, 2012.
- [51] L. K. L. B. Cook, "The Silent Force Multiplier : The History and Role of UAVs in Warfare," in *2007 IEEE Aerospace Conference*, 2007, pp. 1–7.
- [52] J. F. Keane and S. S. Carr, "A brief history of early unmanned aircraft," *Johns Hopkins APL Tech. Dig. (Applied Phys. Lab.)*, vol. 32, no. 3, pp. 558–571, 2013.
- [53] M. P. Huerta, "Integration of civil unmanned aircraft systems (UAS) in the national airspace system (NAS) roadmap," 2013.



- [54] J. P. Aurambout, K. Gkoumas, and B. Ciuffo, "Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities," *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 11, no. 1, p. 21, 2019.
- [55] J. Holden and N. Goel, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation," 2016.
- [56] J. Colito, "Autonomous Mission Planning and Execution for Unmanned Surface Vehicles in Compliance with the Marine Rules of the Road," University of Washington, 2007.
- [57] J. Curcio, J. Leonard, and A. Patrikalakis, "SCOUT - A low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy," in *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, 2005*, 2005, vol. 2005, pp. 725–729.
- [58] G. N. Roberts and R. Sutton, *Advances in unmanned marine vehicles*. The Institution of Electrical Engineers and 2008 The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [59] T. W. Vaneck, C. D. Rodriguez-Ortiz, M. C. Schmidt, and J. E. Manley, "Automated Bathymetry Using an Autonomous Surface Craft," *Navigation*, vol. 43, no. 4, pp. 407–419, 1996.
- [60] M. Caccia *et al.*, "Sampling sea surfaces with SESAMO: An autonomous craft for the study of sea-air interactions," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 95–105, 2005.
- [61] J. Alves *et al.*, "Vehicle and Mission Control of the DELFIM Autonomous Surface Craft," in *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2006, pp. 1–6.
- [62] M. Breivik, "Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles," Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [63] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, "Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges," *Annu. Rev. Control*, vol. 41, no. May, pp. 71–93, 2016.
- [64] O. Yildiz, A. E. Yilmaz, and B. Gokalp, "State-of-the-art system solutions for unmanned underwater vehicles," *Radioengineering*, vol. 18, no. 4, pp. 590–600, 2009.
- [65] L. Stutters, H. Liu, C. Tiltman, and D. J. Brown, "Navigation technologies for autonomous underwater vehicles," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 38, no. 4, pp. 581–589, 2008.
- [66] J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," in *Oceans 2008*, 2008, no. February.
- [67] Rolls-Royce, "Autonomous ships: The next step," 2016.
- [68] Unión Europea, *Directiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 7 de julio de 2010*. 2010, pp. 1–13.
- [69] A. Auer, S. Feese, and S. Lockwood, "History of Intelligent Transportation Systems," 2016.
- [70] D. A. Rosen, F. J. Mammano, and R. Favout, "An Electronic Route-Guidance System



- for Highway Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-19, no. 1, pp. 143–152, 1970.
- [71] Z. Xiong, H. Sheng, W. G. Rong, and D. E. Cooper, “Intelligent transportation systems for smart cities: A progress review,” *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 55, no. 12, pp. 2908–2914, 2012.
- [72] I. Catling and B. McQueen, “Road Transport Informatics in Europe—Major Programs and Demonstrations,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 132–140, 1991.
- [73] T. Tanaka, T. Yamamoto, and S. Fukuda, “Onboard system devices for a vehicle information and communication system,” *FUJITSU TEN Tech J*, vol. 7, pp. 26–34, 1995.
- [74] B. Husch and A. Teigen, “Regulating Autonomous Vehicles,” *LegisBrief*, vol. 25, no. 13, pp. 216–221, 2017.
- [75] National Conference of State Legislatures, “Autonomous Vehicles | Self-Driving Vehicles Enacted Legislation,” *Autonomous Vehicles*, 2020. [Online]. Available: <https://www.ncsl.org/research/transportation/autonomous-vehicles-self-driving-vehicles-enacted-legislation.aspx>. [Accessed: 09-Nov-2020].
- [76] J. Thune, *A Bill To support the development of highly automated vehicle safety technologies and for other purposes*, no. 268. Senate of the United States, 2017, pp. 1–102.
- [77] A. Juhasz, “Towards a European Regulation of Autonomous Vehicles - EU Perspectives and the German Model,” 2018.
- [78] Inside Tech Law, “Autonomous vehicles in France,” *Autonomous vehicles white paper*, 2020. [Online]. Available: https://www.insidetechl.com/autonomous-vehicles/06_france. [Accessed: 11-Nov-2020].
- [79] S. Baker, “How UK law is adapting to cope with autonomous vehicles,” *Engineering and Technology*, 2020. [Online]. Available: <https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/05/how-uk-law-is-adapting-to-cope-with-autonomous-vehicles/>. [Accessed: 11-Oct-2020].
- [80] Intelligent Transport, “China issues national standards for the testing of autonomous vehicles,” 2018. [Online]. Available: <https://www.intelligenttransport.com/transport-news/70487/autonomous-technology-regulations-china/>. [Accessed: 11-Nov-2020].
- [81] T. Imai, “Legal regulation of autonomous driving technology: Current conditions and issues in Japan,” *IATSS Res.*, vol. 43, no. 4, pp. 263–267, 2019.
- [82] Naciones Unidas, “Convención sobre la Circulación Vial. Viena, 8 de Noviembre de 1968,” *dipublico.org*, 1968. [Online]. Available: <https://www.dipublico.org/10838/convencion-sobre-la-circulacion-vial-viena-8-de-noviembre-de-1968/>. [Accessed: 10-Nov-2020].
- [83] Y. del Canto, “Normas y Tratados Internacionales en Materia de Seguridad Vial. Normativa Comunitaria en Materia de Tráfico,” Dirección General de Tráfico, 2011, pp. 1–27.
- [84] Dirección General de Tráfico (DGT), *Instrucción 15/V-113: Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general*. Madrid: Ministerio del Interior, 2015, pp. 1–49.



- [85] Junta de Castilla y León, *Ley 9 / 2018 , de 20 de diciembre , de transporte público de viajeros por carretera de Castilla y León* . Valladolid, Sapin, 2019, pp. 1–42.
- [86] A. Silván, *Convenio de Colaboración para la realización de pruebas y ensayos de vehículos autónomos entre el Ayuntamiento de León y AUVSI Spain*. León: Ayuntamiento de León, 2019, pp. 1–12.
- [87] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Convention on International Civil Aviation,” no. December. ICAO, Chicago Il., USA, pp. 1–61, 1944.
- [88] European Union Aviation Safety Agency, “EASA,” 2020. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/home>. [Accessed: 12-Nov-2020].
- [89] Eurocontrol, “About Us Eurocontrol,” 2020. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/about-us>. [Accessed: 12-Nov-2020].
- [90] Federal Aviation Administration, “A Brief History of the FAA,” 2017. [Online]. Available: https://www.faa.gov/about/history/brief_history/. [Accessed: 12-Nov-2020].
- [91] L. Tania, “Civil and Military Drones - Navigating a Disruptive and Dynamic Technological Ecosystem,” 2019.
- [92] C. Stöcker, R. Bennett, F. Nex, M. Gerke, and J. Zevenbergen, “Review of the current state of UAV regulations,” *Remote Sens.*, vol. 9, no. 5, pp. 33–35, 2017.
- [93] International Civil Aviation Organization (ICAO), “Unmanned Aircraft Systems (UAS),” ICAO, Quebec, Canada, 2011.
- [94] European Aviation Safety Agency (EASA), “Riga Declaration on Remotely Piloted Aircraft (drones),” in *Framing the future of aviation*, 2015, pp. 1–5.
- [95] Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), “¿Qué es AESA?,” *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*, 2020. [Online]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/quienes-somos/que-es-aesa>. [Accessed: 16-Nov-2020].
- [96] Gobierno de España, *Real Decreto-Ley 8/2014, 4 julio*. 2014, pp. 52544–52715.
- [97] Gobierno de España, *Real Decreto 1036/2017 - utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto*. BOE, 2017, p. 47995.
- [98] Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), “Normativa RPAS,” *Normativa Europea RPAS*, 2020. [Online]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/normativa-rpas#Normativa Nacional>. [Accessed: 16-Nov-2020].
- [99] United Nations, “United Nations Convention on the Law of the Sea.” UN, 1970.
- [100] International Maritime Organization (IMO), “Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea , 1972.” 1972.
- [101] H. Bi, C. Gao, and Y. Ma, “Research on the Legal Status of Unmanned Surface Vehicle,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1069, no. 1, 2018.
- [102] International Maritime Organization, “Scoping exercise on autonomous vessels put on agenda,” *Maritime Safety Committee (MSC) 98th session*, 2017. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MSC-98th-session.aspx>. [Accessed: 18-Nov-2020].



- [103] Comité Maritime International (CMI), “CMI International Working Group Position Paper on Unmanned Ships and the International Regulatory Framework,” 2018.
- [104] F. Ferreira, J. Alves, C. Leporati, A. Bertolini, and E. Bargelli, “Current regulatory issues in the usage of Autonomous Surface Vehicles,” in *2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO)*, 2019.
- [105] R. Leenes, E. Palmerini, B. J. Koops, A. Bertolini, P. Salvini, and F. Lucivero, “Regulatory challenges of robotics: Some guidelines for addressing legal and ethical issues,” *Law, Innov. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–44, 2017.
- [106] J. Weisenthal, “5th Avenue, 1900 Vs. 1913,” *Business Insider*, 2011. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.com/5th-ave-1900-vs-1913-2011-3>. [Accessed: 10-Dec-2020].
- [107] AUVSI Spain Chapter, “Hoja de Indicaciones,” in *Dialogo 2017*, 2017, pp. 1–16.
- [108] European Environment Agency, “Electric Vehicles in Europe,” 2016.
- [109] E. Ferrero, S. Alessandrini, and A. Balanzino, “Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway,” *Appl. Energy*, vol. 169, no. x, pp. 450–459, 2016.
- [110] J. A. P. Lopes, F. J. Soares, and P. M. R. Almeida, “Integration of electric vehicles in the electric power system,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 168–183, 2011.
- [111] S. Bubeck, J. Tomaschek, and U. Fahl, “Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany,” *Transp. Policy*, vol. 50, pp. 63–77, 2016.
- [112] B. Sarlioglu and C. T. Morris, “More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft,” *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 1, no. 1, pp. 54–64, 2015.
- [113] T. A. Rodrigues, G. S. Neves, L. C. S. Gouveia, M. A. Abi-Ramia, M. Z. Fortes, and S. Gomes, “Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 155, pp. 350–362, 2018.
- [114] D. J. Fagnant and K. Kockelman, “Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 77, pp. 167–181, 2015.
- [115] P. Koopman and M. Wagner, “Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge,” *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 90–96, 2017.
- [116] R. Sparrow and M. Howard, “When human beings are like drunk robots: Driverless vehicles, ethics, and the future of transport,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 80, pp. 206–215, 2017.
- [117] B. Hayes, “Leave the Driving to it,” *Am. Sci.*, vol. 99, pp. 362–366, 2011.
- [118] S. Hörl, F. Ciari, and K. W. Axhausen, “Recent perspectives on the impact of autonomous vehicles,” *Work. Pap. Inst. Transp. Plan. Syst.*, vol. 10XX, no. June 2017, p. 38, 2016.
- [119] T. Litman, “Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning,” *Transp. Res. Board Annu. Meet.*, no. 2014, pp. 36–42, 2018.
- [120] C. Dawson, “Your Next Car May Be a Living Room on Wheels,” *The Wall Street Journal*, 2017. [Online]. Available: <https://www.wsj.com/articles/your-next-car-may->



- be-a-living-room-on-wheels-1497881613?mod=videorelated. [Accessed: 10-Dec-2020].
- [121] J. Alonso-Mora, S. Samaranayake, A. Wallar, E. Frazzoli, and D. Rus, "On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, no. 3, pp. 462–467, 2017.
- [122] J. Arbib and T. Seba, "Rethinking Transportation 2020-2030," 2017.
- [123] SAE International, "Recommended Practice J3016," 2018.
- [124] A. C. Watts, V. G. Ambrosia, and E. A. Hinkley, "Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use," *Remote Sens.*, vol. 4, no. 6, pp. 1671–1692, 2012.
- [125] B. Clough, "Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway?," *Air Force Res. Lab Wright-Patterson AFB OH*, no. 990, pp. 313–319, 2002.
- [126] K. Cui, Z. Yang, and W. Sun, "The Collaborative Autonomy and Control Framework for Unmanned Surface Vehicle," in *Proceedings - 2015 9th International Conference on Frontier of Computer Science and Technology, FCST 2015*, 2015, no. September, pp. 242–247.
- [127] A. A. Kurzhanskiy and P. Varaiya, "Traffic management: An outlook," *Econ. Transp.*, vol. 4, no. 3, pp. 135–146, 2015.
- [128] Flight Global, "Colourised images mark centenary of world's first control tower," 2020. [Online]. Available: <https://www.flightglobal.com/safety/colourised-images-mark-centenary-of-worlds-first-control-tower/136903.article>. [Accessed: 04-Feb-2021].
- [129] Wikipedia, "1956 Grand Canyon mid-air collision." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/1956_Grand_Canyon_mid-air_collision. [Accessed: 04-Feb-2021].
- [130] E. P. Directorate General for Research, "Civilian and Military Air Traffic Control in the EU," Brussels, 2001.
- [131] OACI, "Anexo 11: Servicios de tránsito aéreo," Montreal, Canada, 2016.
- [132] FAA - EU, *State of Harmonisation*, Second edi. Lusemburg: Publications Office of the European Union, 2016.
- [133] P. Kopardekar, *Unmanned Aerial System (UAS) Traffic Management (UTM): Enabling Low-Altitude Airspace and UAS Operations*, vol. 2, no. April. Moffett Field, California: Ames Research Center, 2014.
- [134] P. Kopardekar, T. Prevot, J. Rios, J. E. Robinson III, M. Johnson, and J. Jung, "Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept of Operations," in *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2016, no. September, pp. 1–17.
- [135] F. van Westrenen and G. Praetorius, "Maritime traffic management: A need for central coordination?," *Cogn. Technol. Work*, vol. 16, no. 1, pp. 59–70, 2012.
- [136] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, *IALA Vessel Traffic Manual*, 4th ed. Saint Germain en Laye, 2008.



- [137] International Maritime Organization (IMO), "Guidelines for Vessel Traffic Services," London, 1997.
- [138] M. Lind, M. Hägg, U. Siwe, and S. Haraldson, "Sea Traffic Management - Beneficial for all Maritime Stakeholders," *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 183–192, 2016.
- [139] Asociación de Industrias de Telecomunicaciones, "Estándar de infraestructura de telecomunicaciones para centros de datos. TIA-942." Telecommunications Industry Association (TIA), Arlington, Virginia, USA, pp. 1–237, 2005.
- [140] Jefatura del Estado, *Ley 8 / 2011 , de 28 de abril , por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas*. 2011, pp. 1–11.
- [141] C. Cadena *et al.*, "Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 32, no. 6, pp. 1309–1332, 2016.
- [142] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, "Simultaneous localization and mapping: Part I," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 99–108, 2006.
- [143] R. Yagfarov, M. Ivanou, and I. Afanasyev, "Map Comparison of Lidar-based 2D SLAM Algorithms Using Precise Ground Truth," in *15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Viion (ICARCV)*, 2018, pp. 1979–1983.
- [144] I. Caminal, J. R. Casas, and S. Royo, "SLAM-BASED 3D OUTDOOR RECONSTRUCTIONS FROM LIDAR DATA," in *2018 International Conference on 3D Immersion (IC3D)*, 2018, pp. 1–8.
- [145] J. Weingarten, "Feature-based 3D SLAM," Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2006.
- [146] C. Park, P. Moghadam, S. Kim, A. Elfes, C. Fookes, and S. Sridharan, "Elastic LiDAR fusion: Dense map-centric continuous-time SLAM," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 1206–1213.
- [147] D. Droschel and S. Behnke, "Efficient continuous-time SLAM for 3D lidar-based online mapping," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, pp. 5000–5007.
- [148] Y. Cao *et al.*, "Adversarial Sensor Attack on LiDAR-based Perception in Autonomous Driving," in *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security - CCS '19*, 2019, pp. 2267–2281.
- [149] S. Royo and M. Ballesta-Garcia, "An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 19, 2019.
- [150] C. Rablau, "Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences," in *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019*, 2019, vol. 11143, pp. 111430-1–14.
- [151] B. Huang, J. Zhao, and J. Liu, "A Survey of Simultaneous Localization and Mapping with an Envision in 6G Wireless Networks," *arXiv Prepr. arXiv1909.05214*, no. October, pp. 1–15, 2019.
- [152] T. Gee, J. James, W. Van Der Mark, P. Delmas, and G. Gimel'Farb, "Lidar guided stereo simultaneous localization and mapping (SLAM) for UAV outdoor 3-D scene reconstruction," *Int. Conf. Image Vis. Comput. New Zeal.*, vol. 0, pp. 1–6, 2016.



- [153] T. Yang, P. Li, H. Zhang, J. Li, and Z. Li, "Monocular vision SLAM-based UAV autonomous landing in emergencies and unknown environments," *Electronics*, vol. 7, no. 5, pp. 1–18, 2018.
- [154] B. J. Moorman and F. A. Michel, "Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar," *Journal of Paleolimnology*, vol. 18, no. 1, pp. 61–73, 1997.
- [155] R. E. Hansen, H. J. Callow, T. O. Sæbø, and S. A. V. Synnes, "Challenges in seafloor imaging and mapping with synthetic aperture sonar," *Proc. Eur. Conf. Synth. Aperture Radar, EUSAR*, vol. 49, no. 10, pp. 540–543, 2011.
- [156] B. M. Costa, T. A. Battista, and S. J. Pittman, "Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 5, pp. 1082–1100, 2009.
- [157] J. M. Esposito and M. Graves, "An algorithm to identify docking locations for autonomous surface vessels from 3-D LiDAR scans," *IEEE Conf. Technol. Pract. Robot Appl. TePRA*, pp. 4–9, 2014.
- [158] E. S. Ueland, R. Skjetne, and A. R. Dahl, "Marine autonomous exploration using a lidar and slam," in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2017, p. V006T05A029.
- [159] N. Quadros, P. Collier, and C. Fraser, "Integration of bathymetric and topographic Lidar: a preliminary investigation," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Beijing 2008*, vol. XXXVII, no. B8, pp. 1299–1304, 2008.
- [160] "When will we have Autonomous Vehicles?," *Langkilde*, 2018. [Online]. Available: <https://langkilde.se/blog/2019/10/18/when-will-we-have-autonomous-vehicles>. [Accessed: 07-Apr-2021].
- [161] M. M. Waldrop, "Autonomous vehicles: No drivers required," *Nature*, vol. 518, no. 7537, pp. 20–23, 2015.
- [162] D. Watzenig and M. Horn, *Automated Driving*. Switzerland: Springer, 2017.
- [163] S. P. Smith, "Inertial Navigation Sensors," 2010.
- [164] Y. Lu, Z. Xue, G. S. Xia, and L. Zhang, "A survey on vision-based UAV navigation," *Geo-Spatial Inf. Sci.*, vol. 21, no. 1, pp. 21–32, 2018.
- [165] D. O. Nitti, F. Bovenga, M. T. Chiaradia, M. Greco, and G. Pinelli, "Feasibility of using synthetic aperture radar to aid UAV navigation," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, pp. 18334–18359, 2015.
- [166] K. Kiela *et al.*, "Review of V2X-IoT standards and frameworks for ITS applications," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 12, 2020.
- [167] J. Choi *et al.*, "Regulatory options and technical challenges for the 5.9 GHz spectrum: Survey and analysis," *arXiv*, pp. 1–6, 2018.
- [168] M. Lozano and M. Sanguino, "Review on V2X, I2X, and P2X Communications and Their Applications : A Comprehensive Analysis over Time," *Sensors*, no. Figure 1, pp. 1–29, 2019.
- [169] F. C. Commission, "FCC Allocates Spectrum in 5,9 GHz Range for Intelligent Transportation Systems Uses," 1999. [Online]. Available:



- https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/1999/nret9006.html. [Accessed: 12-May-2021].
- [170] ETSI, “Newly published ETSI Harmonized Standard enables market placement of radio equipment for road safety and traffic management,” *Harmonized Standard ETSI EN 302 571 Intelligent Transport Systems (ITS)*, 2008. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20120218204434/http://www.etsi.org/WebSite/NewsandEvents/2008_09_Harmonizedstandards_ITS.aspx. [Accessed: 12-May-2021].
- [171] 5GAA Automotive Association, “Coexistence of C-V2X and ITS-G5 at 5.9GHz,” 2018.
- [172] A. Bazzi, A. Zanella, I. Sarris, and V. Martinez, “Co-channel Coexistence: Let ITS-G5 and Sidelink C-V2X Make Peace,” in *2020 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, ICMIM 2020*, 2020.
- [173] C. K. Anjinappa and I. Guvenc, “Millimeter-wave V2X channels: Propagation statistics, beamforming, and blockage,” in *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2018, pp. 1–6.
- [174] L. Wang, B. Ai, D. He, H. Yi, Z. Zhong, and J. Kim, “Vehicle-to-infrastructure channel characterization in urban environment at 28 GHz,” *China Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 36–48, 2019.
- [175] S. Dimce, M. S. Amjad, and F. Dressler, “mmWave on the Road: Investigating the Weather Impact on 60 GHz V2X Communication Channels,” in *2021 16th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, 2021, pp. 1–8.
- [176] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, “Survey of Important Issues in UAV Communication Networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2016.
- [177] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, “A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107769–107792, 2019.
- [178] A. Coker, L. Straatemeier, T. Rogers, P. Valdez, D. Cooksey, and K. Griendling, “Maritime channel modeling and simulation for efficient wideband communications between autonomous Unmanned Surface Vehicles,” in *OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego: An Ocean in Common*, 2013, pp. 1–9.
- [179] P. Norgren, M. Ludvigsen, T. Ingebretsen, and V. E. Hovstein, “Tracking and remote monitoring of an autonomous underwater vehicle using an unmanned surface vehicle in the Trondheim fjord,” in *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 2015, no. October.
- [180] T. G. Junfeng Ge, Tao Li, “The Wireless Communications for Unmanned Surface Vehicle: An Overview,” in *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2018, pp. 113–119.
- [181] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), “Tecnología de la Información - Interconexión de Sistemas Abiertos - El modelo de referencia básico X.200,” vol. 200. UIT, p. 68, 1994.
- [182] J. Díez-González, R. Álvarez, L. Sánchez-González, L. Fernández-Robles, H. Pérez, and M. Castejón-Limas, “3D Tdoa problem solution with four receiving nodes,”



- Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 13, 2019.
- [183] R. Álvarez, J. Díez-González, E. Alonso, L. Fernández-Robles, M. Castejón-Limas, and H. Perez, "Accuracy analysis in sensor networks for asynchronous positioning methods," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 13, pp. 1–13, 2019.
- [184] J. Díez González, "Análisis de Sistemas Temporales de Posicionamiento Local para Aplicaciones de Elevada Exactitud: Desambiguación en el Cálculo de la Posición, Distribuciones Optimizadas de Sensores y Comportamiento Mejorado en Condiciones de Fallo," Universidad de León, 2020.
- [185] R. Álvarez Fernández, "Optimización mediante Algoritmos Genéticos y caracterización de incertidumbres de ruido, relojes y Non-Line-of-Sight en sistemas de posicionamiento basados en mediciones temporales," Universidad de León, 2020.
- [186] Las Cortes, *Constitución Española*. Madrid, España: Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 1978.
- [187] Ministerio del Interior, "Normativa básica reguladora," *Funciones y Estructura*, 2021. [Online]. Available: <http://www.interior.gob.es/el-ministerio/funciones-y-estructura/normativa-basica-reguladora>. [Accessed: 17-May-2021].
- [188] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Normativa Estatal Vigente," *Normativa*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/normativa>. [Accessed: 17-May-2021].
- [189] Las Cortes (BOE), *Ley orgánica 5/1987, de 30 de julio, de delegación de facultades del estado en las comunidades autónomas en relación con los transportes por carretera y por cable*. Las Cortes, 1987.
- [190] Ministerio del Interior, "Funciones Dirección General de Tráfico," *Funciones y Estructura*, 2021. [Online]. Available: <http://www.interior.gob.es/el-ministerio/funciones-y-estructura/subsecretaria-del-interior/direccion-general-de-traffic>. [Accessed: 17-May-2021].
- [191] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Dirección General de Transporte Terrestre," *Organización y funciones*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.es/transporte-terrestre/organizacion-y-funciones/tt>. [Accessed: 17-May-2021].
- [192] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Dirección General de Carreteras," *Organización y funciones*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/carreteras/organizacion-y-funciones/secretaria-general-de-infraestructuras/direccion-general-de-carreteras>. [Accessed: 17-May-2021].
- [193] Jefatura del Estado, *Ley 7/1985, de 2 de abril, Reguladora de las Bases del Régimen Local*, vol. 80. 1985.
- [194] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Estructura del sector ferroviario en España," *Organización del sector ferroviario*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/ferrocarriles/estructura-del-sector-ferroviario-en-espana/principales-agentes-del-sector-ferroviario>. [Accessed: 17-May-2021].
- [195] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Dirección General de Planificación y Evaluación de la Red Ferroviaria," *Organización y funciones*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/ferrocarriles/organizacion-y->



- funciones/fc. [Accessed: 17-May-2021].
- [196] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria," *¿Qué es la AESF?*, 2021. [Online]. Available: <https://www.seguridadferroviaria.es/quienes-somos/que-es-la-aesf>. [Accessed: 17-May-2021].
- [197] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Normativa aplicable al sector aéreo," *Normativa y Procedimientos*, 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/areas-de-actividad/aviacion-civil/legislacion-del-sector-aereo/normativa-basica-del-sector-aereo-estructura/disposiciones-basicas1>. [Accessed: 17-May-2021].
- [198] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Quiénes somos," *Conoce Enaire*, 2021. [Online]. Available: https://www.enaire.es/sobre_enaire/conoce_enaire/quienes_somos. [Accessed: 17-May-2021].
- [199] AENA, "Perfil de la compañía AENA," *Área corporativa*, 2021. [Online]. Available: <https://portal.aena.es/es/corporativa/perfil-compania.html>. [Accessed: 17-May-2021].
- [200] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Dirección General de Aviación Civil," 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/aviacion-civil/organizacion-y-funciones/secretaria-general-de-transporte-y-movilidad/direccion-general-aviacion-civil>. [Accessed: 17-May-2021].
- [201] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Quiénes somos SENASA," 2021. [Online]. Available: <https://www.senasa.es/index.php?lang=es-ES&idPag=6>. [Accessed: 17-May-2021].
- [202] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Competencias Administrativas Marina Mercante," 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/marina-mercante/nautica-de-recreo/competencias-administrativas/ministerio-de-fomento>. [Accessed: 12-May-2021].
- [203] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Misión y Área de Responsabilidad SASEMAR," *Salvamento Marítimo*, 2021. [Online]. Available: <http://www.salvamentomaritimo.es/conocenos/nuestra-actividad/mision-y-area-de-responsabilidad>. [Accessed: 15-May-2021].
- [204] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, "Competencias de Puertos del Estado," 2021. [Online]. Available: http://www.puertos.es/es-es/portaldetransparencia/Paginas/P_Transparencia_Institucional.aspx. [Accessed: 15-May-2021].
- [205] M. y A. U. Ministerio de Transportes, "Competencias Administrativas Marítimas," 2021. [Online]. Available: <https://www.mitma.gob.es/marina-mercante/nautica-de-recreo/competencias-administrativas/competencias-administrativas-en-materia-de-embarcaciones-de-recreo>. [Accessed: 12-May-2021].
- [206] Asamblea General de las Naciones Unidas, "Declaración Universal de los Derechos Humanos." Naciones Unidas, Paris, 1948.
- [207] Ayuntamiento de León and Steer Davies Gleave, "Plan integral de movilidad sostenible para la ciudad de León," León, 2009.



- [208] Instituto Nacional de Estadística (INE), “Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero,” *Población por provincias y sexos*, 2021. [Online]. Available: <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2852&L=0>. [Accessed: 25-May-2021].
- [209] Dirección General de Tráfico (DGT), “Parque Móvil,” *Tablas Estadísticas*, 2021. [Online]. Available: <https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>. [Accessed: 28-May-2021].
- [210] A. Sanz, P. Vega, and M. Mateos, *Cuentas Ecológicas del Transporte*, 2 edición. Madrid: Ecologistas en Acción, 2014.
- [211] A. Moya García, “Desarrollo de un simulador 3D de un sistema inteligente de asignación de vehículos autónomos bajo demanda en tiempo real,” Universidad de León, 2019.
- [212] E. Alonso, C. Arpón, M. González, R. Á. Fernández, and M. Nieto, “Economic impact of autonomous vehicles in Spain,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 12, no. 1, 2020.
- [213] International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA), “Vehicles Sales Statistics,” *Global Sales Statics*, 2020. [Online]. Available: <https://www.oica.net/category/sales-statistics/>. [Accessed: 02-Jun-2021].
- [214] C. Peláez Álvarez, “Software de Simulación de Tráfico Inteligente,” Universidad de León, 2018.
- [215] D. Muñoz Abia, “Software de Simulación de Intersecciones Inteligentes I,” Universidad de León, 2019.
- [216] C. Fernández Valladares, “Sistema de Gestión Óptima del Tráfico Inteligente mediante Neuroevolución,” Universidad de León, 2019.
- [217] C. Missikpode, C. Peek-Asa, T. Young, and C. Hamann, “Does crash risk increase when emergency vehicles are driving with lights and sirens?,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 113, pp. 257–262, Apr. 2018.
- [218] A. Buchenscheit, F. Schaub, F. Kargl, and M. Weber, “A VANET-based emergency vehicle warning system,” in *2009 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2009, pp. 1–8.



AGRADECIMIENTOS

La presente tesis doctoral es el resultado de un largo camino en el que te acompañan numerosas personas con las que compartes trabajo, ilusión, esfuerzo y dedicación, además de unos objetivos, ideales y visión de futuro. Me gustaría expresar en estas líneas mi gratitud hacia estas personas por todos los momentos y experiencias vividas durante este viaje, tanto en el ámbito personal como en el profesional.

Gracias, en primer lugar, al catedrático Ángel Alonso y al Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León por haber confiado en un grupo de ingenieros recién titulados para iniciar un proyecto ilusionante y ambicioso en el ámbito de la automatización del transporte, que fue el germen donde se inició esta tesis doctoral.

A mis directores de tesis, Ramón Ángel Fernández y Mariano Nieto, por haber confiado en mí cuando les planteé los objetivos de la tesis y haberme orientado, ayudado y aconsejado en la investigación universitaria. Para mí es un honor haber tenido como directores a dos excelentes profesores universitarios. Le dedico un afectuoso recuerdo a Mariano, que desafortunadamente nos abandonó hace unos meses.

A Drotium, que ha sido la empresa donde se ha realizado la investigación y el desarrollo de esta tesis doctoral. Me ha permitido un gran crecimiento y aprendizaje personal y profesional, y he tenido la oportunidad de conocer a grandes profesionales. Agradezco a Antonio Yuste su visión de futuro y capacidad de pensar en grande, su pasión y compromiso por obtener soluciones a través de la ingeniería que representen mejoras notables para la sociedad. Ha sido un placer compartir tantos momentos, reuniones y viajes. Agradezco también a Luis Ramos, con quien he tenido la oportunidad de compartir tantos momentos desde aquel primer día en el que empezamos juntos esta aventura. Guardo un especial recuerdo de Mireia Prats, Paula Verde y Sergio Martínez, de todas aquellas mañanas, tardes y noches que pasamos en los inicios ingeniando, diseñando y discutiendo cómo encontrar soluciones a los diferentes problemas que iban apareciendo.

En la etapa más reciente, me gustaría agradecer a mis compañeros de Drotium Martín Bayón, Cristian Canseco y Rubén Álvarez por su capacidad de trabajo, conocimientos y entrega, ha sido un lujo compartir tantos momentos juntos. De igual modo, a Cristina Arpón y María González por el gran trabajo que realizaron que ha representado una contribución importante de la actividad investigadora. Aprovecho para agradecer también al resto de personas que han formado parte de Drotium durante estos años.

No puedo dejar de agradecer a la Universidad de León y a la Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial, lugar que me acogió hace diez años y donde he recibido mi formación académica con excelencia. Además, por su apuesta por el sector de los sistemas no tripulados y autónomos, y la inestimable cooperación y ayuda durante estos años. Particularmente, destaco a los respectivos equipos directivos, así como a los grupos de investigación y profesores implicados. Me gustaría dedicarle unas palabras a David Borge, un excelente profesor y amigo, cuya buena voluntad y ganas de empujar hacia delante son admirables, ha sido un honor coincidir contigo.



A mis amigos y personas cercanas que lo largo de estos años me han acompañado en los buenos y malos momentos, que han supuesto un apoyo en las situaciones de dificultad y me han ayudado a encontrar la motivación para seguir adelante con este proyecto.

Por último, y más importante, a mi familia por su apoyo constante durante estos años. En especial, a mis padres, Ángel y Mari Paz, por haberme enseñado y guiado desde pequeño con sabiduría, honradez y cariño. Han sido el mejor ejemplo en el que me podría fijar, y me siento tremendamente orgulloso de ellos. A mi hermana, Noanca, por haberme aguantado toda la vida y la gran cantidad de buenos momentos que hemos pasado juntos. Gracias de corazón.



ANEXO I. PUBLICACIÓN CIENTÍFICA QUE AVALA LA TESIS DOCTORAL

Este Anexo I a la Tesis Doctoral incluye la publicación científica en su versión original que se presenta como aval en la misma. Los datos del mencionado artículo científico, citado a lo largo de la tesis [212], son los siguientes:

- Título: Economic Impact of Autonomous Vehicles in Spain
- Revista: European Transport Research Review
- Autores: Efrén Alonso, Cristina Arpón, María González, Ramón Ángel Fernández y Mariano Nieto.
- Publicación: 31 de octubre de 2020.
- DOI: 10.1186/s12544-020-00452-4

ORIGINAL PAPER

Open Access

Economic impact of autonomous vehicles in Spain



Efrén Alonso^{1*} , Cristina Arpón¹, María González¹, Ramón Ángel Fernández² and Mariano Nieto³

Abstract

Background: Pollution, traffic accidents, and congestion are huge problems in most urban areas. Autonomous and electric vehicles are leading our society to a new mobility model, also known as the New Era of Transportation (NERTRA). Mobility is a strategic issue for any country, and this change of model will mean, in addition to a great technological revolution, an economic revolution.

Methodology: The purpose of this work is to carry out a study of the main economic sectors affected in Spain and evaluate the economic impact that autonomous vehicles will have on each one. Data from this sector have been collected, analyzing the economic and technological factors that will affect to a greater or lesser extent and made evolution forecasts.

Results: The study presents three different scenarios depending on how the transition progresses. The results are presented by each sector in each of these scenarios. These results have great value for the industry itself and the professionals affected, as well as for the authorities of the country to take the appropriate measures from the beginning of the transition. The sectors directly affected by this change represent more than 38% of the gross domestic product of Spain. Key factors, such as technological innovation in vehicles, and the emergence of new business and mobility models determine drastic changes in some important sectors. It is important to make quick decisions both from administrations and from the industry itself to adapt to new mobility.

Keywords: Autonomous vehicles, Mobility, Economy, Spain, NERTRA, GDP

1 Introduction

Autonomous vehicles are a disruptive change in transport systems. These vehicles will change the way people and goods move, and also the way we do business. Research on autonomous vehicles has grown significantly in the last decade. In 2003, the Grand Challenge was launched by the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) to spur innovation in unmanned ground vehicle navigation. In 2005, Stanford's robot "Stanley" was finished the race ahead of all other vehicles and won the challenge [1]. Companies like Tesla, Uber, Lyft, or Google, among many others, have developed autonomous technologies in order to have autonomous-driving commercial services. In June 2018 Waymo's

autonomous vehicles fleet had self-driven more than 7 million miles, mostly on city streets [2].

A great revolution is coming in transport, and the key issue that determines the success of these technologies is the huge problems they will solve: pollution, accidents, and congestion. Air pollution is a very important environmental and social issue. Particulate matters, ozone, nitrogen dioxide, benzene, among other pollutants, have adverse effects on human health and the environment. The 2016 European air quality report, published by EEA, showed that 31,520 people died in Spain that year because of pollution [3]. It estimates that over 520,000 people die each year in Europe because of pollution. Traffic accidents are a social drama. In 2016, 102,635 accidents were registered in Spain and 1810 people died [4]. These fatalities have major economic impacts; the cost is on the order of 10,3 billion € per year in Spain.

* Correspondence: alonf00@estudiantes.unileon.es

¹Drotium, a Mobility Company, Avenida de los Jesuitas 13, 24007 León, Spain
Full list of author information is available at the end of the article

This issue is really a large-scale problem, the World Health Organization estimated that 1,25 million people died in the world in 2013 due to traffic accidents [5]. The study of the NHTSA estimates that about 93% of accidents are caused by human factors [6]. Congestion and bottlenecks are a great concern of many cities all around the world, the bigger the metropolitan area, the greater the importance of this issue. A recent study of the impact of traffic congestion in different cities of Spain estimates that Spanish people spent an average of 17 h in congestion in 2017 [7]. The worst cities are Madrid and Barcelona, where this value increases to 42 and 33 h, respectively. It means that Spanish people spend over 830 million hours per year in congestion.

Electric vehicles have the potential to eliminate almost all the emissions from the combustion engine vehicles while the power generation will be sustainable [8]. Autonomous vehicles have the potential to dramatically reduce crashes [9]. Artificial intelligence and communication technologies bring new solutions and business models, such as ride-sharing services, on-demand services, or “Mobility as a service” (MaaS), which will reduce congestion in urban areas.

The economic effects of this revolution in transport will be very remarkable. One of the first analyses estimated the economic impact of autonomous vehicles up to \$1.9 trillion per year by 2025 [10]. Recent research finds that autonomous driving technology will enable a new economy worth \$7 trillion in 2050 [11].

Technological innovation advances much faster than the legislation that allows its deployment. However, legislation is important to drive the transition to new mobility models. In recent years, Spanish policymakers have already begun this task. In 2015, the Directorate General for Traffic of Spain approved a procedure to regulate and authorized research tests of autonomous vehicles in public roads, through Instruction 15/V-113 [12]. In 2017, the Congress of Deputies of Spain unanimously approved the NLP “Non-Law Proposition for the promotion and development of the autonomous vehicles (Ref. 162/000451)” in order to develop national legislation for these technologies.

This national legislation contemplates any type of test that manufacturers, companies, universities, or research centers wish to carry out. Each autonomous vehicle must obtain a certificate from a technical service accredited by ENAC (National Accreditation Entity) to carry out these experimental tests. This certificate, depending on the characteristics and technology of the vehicle, will limit its scope of operation. Furthermore, each vehicle must have one or more drivers with a valid driver’s license. The driver may be inside the vehicle or act remotely and must be able to take full control of the vehicle in the event of any eventuality that arises.

At the regional level, the first administration to legislate this sector was Castilla y León Government through Law 9/2018, of December 20, on public transport for passengers by roads by regulating autonomous driving and the new mobility system [13]. On March 18, 2019, the City Council of León signed the agreement that allows experimental tests of autonomous vehicles in the streets of this city. León became in the first Spanish city with a regulation to become a NERTRA City.

Based on the NPL of the Congress of Deputies, it is expected that in the coming months and years, new regulations will be developed in many other regions throughout the country. A good example is the pilot projects carried out recently in cities such as Madrid, Málaga, or Vigo. From a legislative point of view, we can consider that Spain has taken the first steps in the transition towards a new mobility model.

This paper seeks to analyze the impact of autonomous vehicles in the Spanish economy and the main business sectors affected. Section 2 presents the methodology used in this study. Section 3, part 1 shows the results obtained using this methodology, and part 2 shows the analysis of each of the sectors studied in this paper. Finally, the conclusions are presented.

2 Methods

The main objective of this study is to determine how transport will evolve in Spain with the introduction of new technologies, which will lead to a mobile park based on autonomous and electric vehicles.

For this, a collection of data regarding different transport subsectors has been carried out. Macroeconomic figures are analyzed to establish a current map of the state of the sector. Specifically, the Gross Domestic Product will be used as the main indicator of the study because it shows the market value of different sectors in specific periods of time. The study is based on available data whose sources are different organizations and entities referenced throughout the manuscript. Forecasts are made for the future situation of the irruption of these new technologies in transport.

Throughout this article, a series of data regarding the industries considered as most affected by the new mobility paradigm are presented. Secondary sources have been used for data collection, which provides key indicators in the analysis of the current situation of these industries concerning transport. Asserting that a transition phase is going to take place, where autonomous vehicles are going to live together with engine vehicles, an estimation of the future situation of each industry has been made. Different forecasts made on the entry of autonomous vehicles into the market agree that it will not be linear, and will resemble an exponential curve [9, 14]. This means that in the early stages autonomous vehicles will

have a small market share, while in the last stage they will experience great growth. According to these forecasts, the authors have selected three stages of the transition to carry out the study, the first with a market share of 20%, the second with 50%, and the third with 100%, considering them as the most representatives.

Through the analysis of time series, some key indicators are analyzed that demonstrate how the sector would evolve if the transport model continued as before if changes and new technologies were not introduced.

On the other hand, an estimate is made of the variation of the indicators in the proposed scenarios.

For the preparation of the time series, the ARIMA model (an acronym for autoregressive integrated moving average) has been applied and is represented as follows:

$$Y_t = -(\Delta^d Y_t - Y_t) + \phi_0 \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d Y_{t-i} - \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t$$

Where d corresponds to the d differences that are necessary to convert the original series to stationary, ϕ_1, \dots, ϕ_p are the parameters belonging to the “autoregressive” part of the model, $\theta_1, \dots, \theta_q$ the parameters belonging to the “moving averages” part of the model, ε_t is an error term and ϕ_0 is a constant [15].

Taking into account that:

$$\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$$

It is a quantitative method in which the prediction is made based on the historical information we have available. This model is made up of three components: (AR) autoregressive, (I) integrated, and (MA) moving averages. For an ARIMA model (p, d, q) the parameters (p, d, q) must be determined with the most appropriate values. These will be non-negative integers.

First, an exploratory analysis of the data set has been performed. Subsequently, the detection of possible outliers was carried out. In those cases where outliers were present, they have been removed from the study. After cleaning the database, the object has been created for the time series. Its decomposition has been carried out in order to stabilize the variance, as well as to detect and eliminate the trend and seasonality. Finally, forecasting has been carried out through the ARIMA model, determining the optimal model.

The series modeled in this manuscript are, on the one hand, the number of minor injuries on Spanish roads; the movement of goods (in tons) transported by air; and the consumer price index of the transport sector, analyzed under the hypothesis of continuity of the current transportation model without introducing any changes. On the other hand, the evolution of GDP in the different study sectors, in this case, under the hypothesis of the entry into the market of autonomous vehicles.

According to what was stated in the introduction regarding the relevance that autonomous vehicles will have in the market, the particularization of the model in each of the study sectors is important (Section 3.2). It is necessary to identify different indicators that determine the variation of the model parameters and establish the trend of the prediction. This procedure has been applied to all the predictions made in the study. The results are presented in the next section.

3 Results

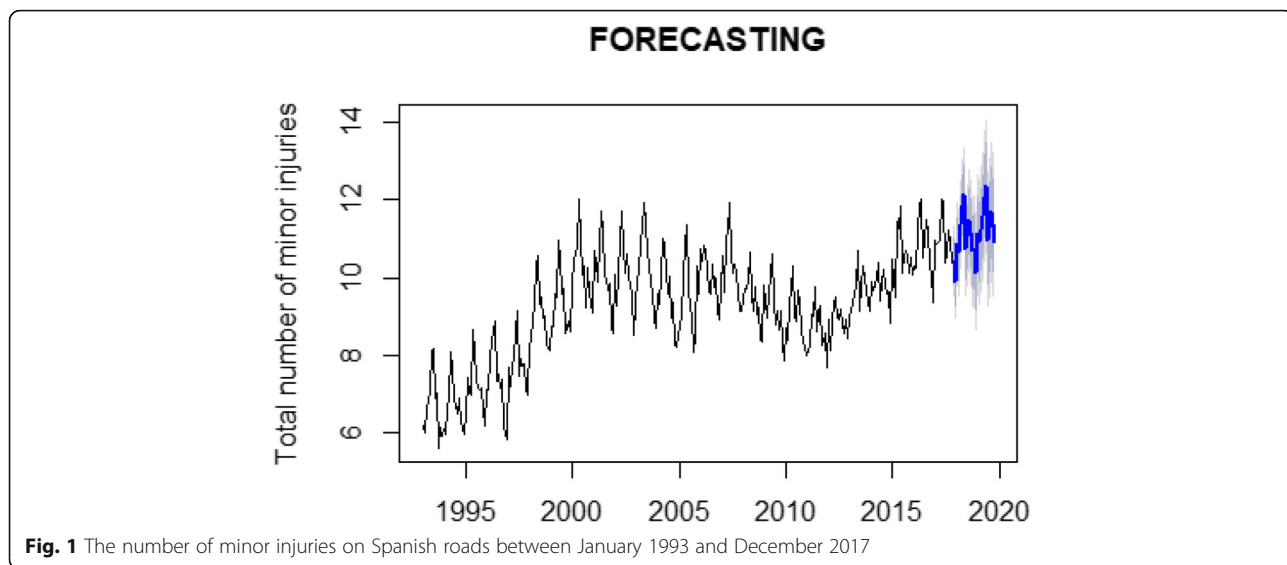
The results of the forecasts made using the ARIMA model and analysis of each sector affected by autonomous vehicles are featured below.

3.1 Forecasting

The variables selected for this study assume, among the available data, a representative sample of the current situation of the sector. In addition, they give us information on how the current scenario would progress if technological improvements in transport were not introduced. In the first case, the number of minor injuries on Spanish roads between January 1993 and December 2017 is analyzed. Road deaths have been reduced, above all, by the driving assistance systems incorporated in the vehicles and, moreover, by the controls established by the authorities. This does not mean, however, that accidents have decreased, but rather that they are less serious. For this reason, the variable minor injuries become relevant to this study. As we can see through Fig. 1, the prediction for this time series confirms a continued increase in the number of minor injuries on the roads.

Secondly, reference is made to air traffic statistics in Spain. The movement of goods (in tons) transported by air between January 2004 and August 2019 has been analyzed. This variable refers to the existing demand within the logistics sector in the airfield. In Fig. 2 we can see how the forecast is an uptrend. This means that, predictably, freight traffic will continue to increase, all of which is encouraged by e-commerce that, in the last decade has achieved a growth in the logistics sector globally. The increase in the transport of goods by air necessarily implies an increase in the transport of goods by land, in the distribution of medium and short distances Fig. 3.

Finally, a forecast for the consumer price index of the transport sector has been made (Fig. 3). The data cover the period from January 2015 to March 2019. The results indicate an uptrend. It should be taken into account that this kind of analysis is carried out only considering historical data and, therefore, does not take into account the influence of other independent variables within the forecast. We can interpret, for example, that the fact that the current transport model is

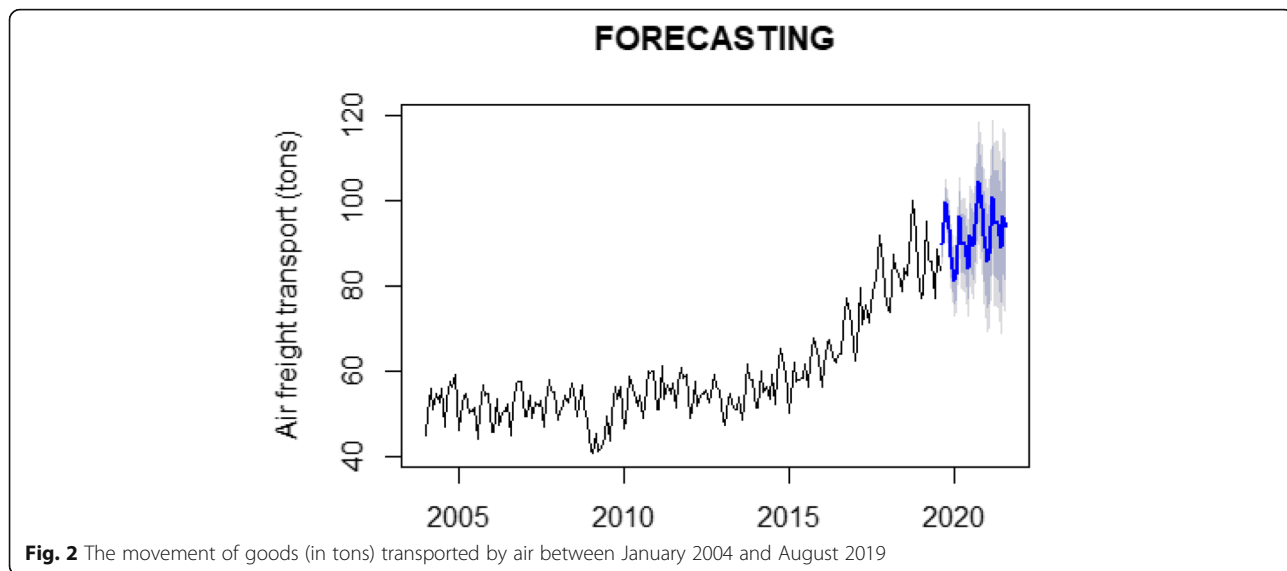


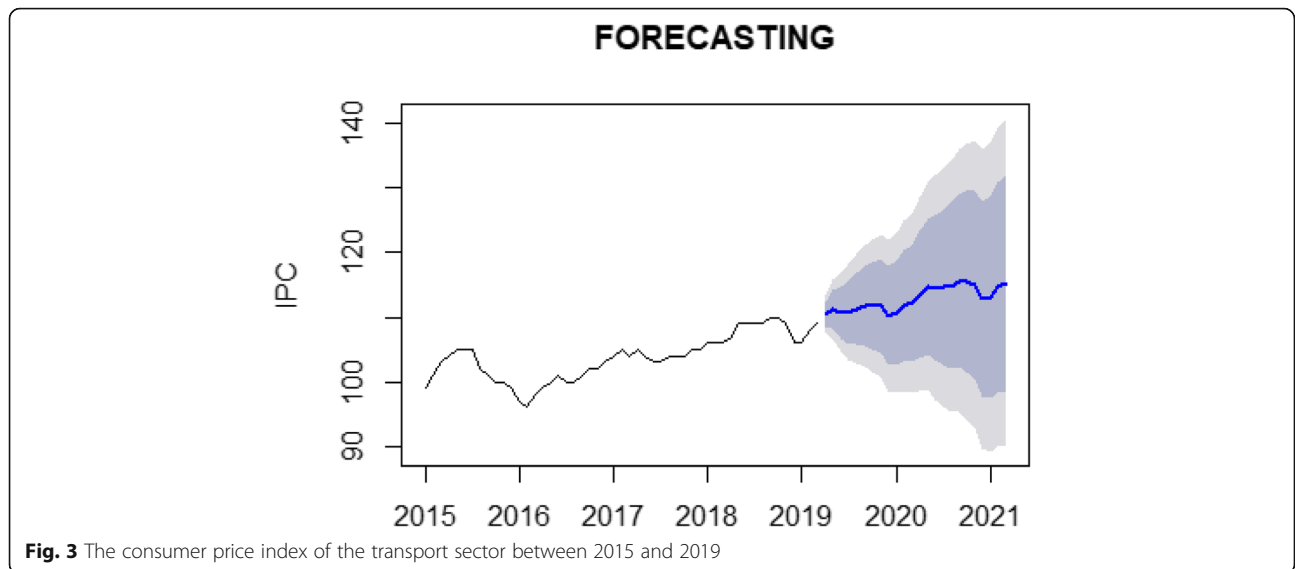
supported by fossil fuels with a limited life cycle, makes prices more expensive for the consumer. Not only that but having a vehicle owned is more expensive than having a mobility service on demand. With a new mobility service, on-demand consumers will have a more customized service while their waiting times will be reduced. This will lead to a greater willingness to move, as it is already mentioned, and will open the door to more flexible fees [16].

A strategic datum for making the forecasts of the impact on GDP in the different sectors is to determine the variation in the number of vehicles. In this case, the results obtained by applying the ARIMA method, described in Section 2, according to key variables and data collection, are presented in a table mode, to facilitate

their understanding and observe the percentage variations in the three scenarios selected for the study. A progressive change can be seen in the configuration of the country's vehicle fleet. These results will be discussed in Section 3.2, part a.

Lastly, the summary of the forecasts of the evolution of the GDP in the analyzed industries is presented, obtained from the application of the ARIMA method as well, basing on the key variables which influence GDP: Consumption, investment public spending, and the framework of the three scenarios proposed: Inclusion of autonomous vehicles in GDP data for 1. Inclusion of 20%; 2. Inclusion of 50%; 3. Inclusion of 100%. As in the previous case, the results are presented in the below chart, Table 2, to obtain a





complete vision of the evolution of the impact in the different sectors according to the growth of the market share that autonomous vehicles will represent. An important negative trend is observed in most of them, while others acquire greater relevance within GDP. See the case of goods transport, the technology industry, and passenger transport. Together these industries represent a 38,16% of Spanish GDP (€445.067,33 million). It is also important to highlight that in 2017, Spanish GDP was €1,166,319 million.

In order to conduct the forecast, the current GDP refers to the year 2017. Also, it is important to underscore that in the energy industry only the

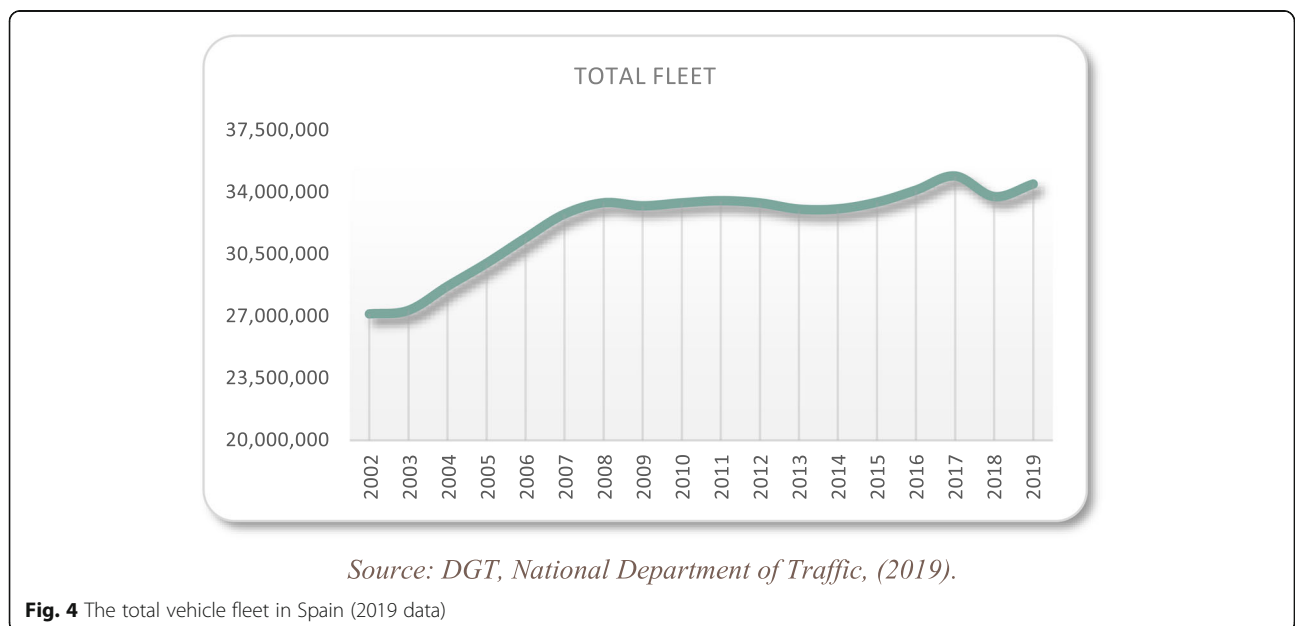
market of fossil fuels will be reduced in the percentages mentioned above.

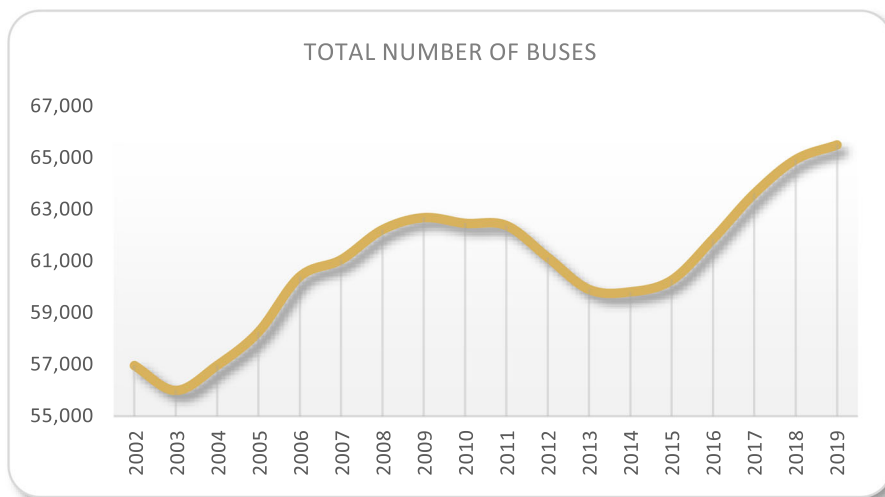
All data has been collected from different Spanish public sources (INE, DGT, and Ministry of Public Works and Transport).

3.2 Analysis of the different sectors

3.2.1 Automotive industry

This section contains the analysis of the vehicle manufacturers. As we can see in Fig. 4, the current vehicle fleet has a positive trend. In other words, the vehicle fleet is increasing year by year and will continue to do





Source: INE, National Institute of Statistics, (2019).

Fig. 5 The total number of buses in Spain (2019 data)

3.2.3 Goods transport

One directly influenced industry by this new mobility model is the goods transport sector. It will greatly benefit in terms of security, in time, and costs.

Technology has made possible a new era where a driver is no need thus, mostly of trips will take place at night. If we add this and the real fact that e-commerce is increasing year by year [23], logistics will increase their effectiveness and their cost will be reduced.

People are buying more by the Internet increasing the number of goods that need to be transported that way

goods transport will increase [24]. One of the needs of the sector is new autonomous vehicles designed for the last mile distribution for both urban areas and rural areas.

Taking into account the online shopping growth in Spain and all over the world, the logistics sector is an important industry in our economy. As Fig. 10 shows, it currently contributes 8% of GDP. At the beginning of the transition, it will not experience a sharp increase but as the evolution of transition progresses its increase will be bigger, increasing up to 58% when the transition is completed.

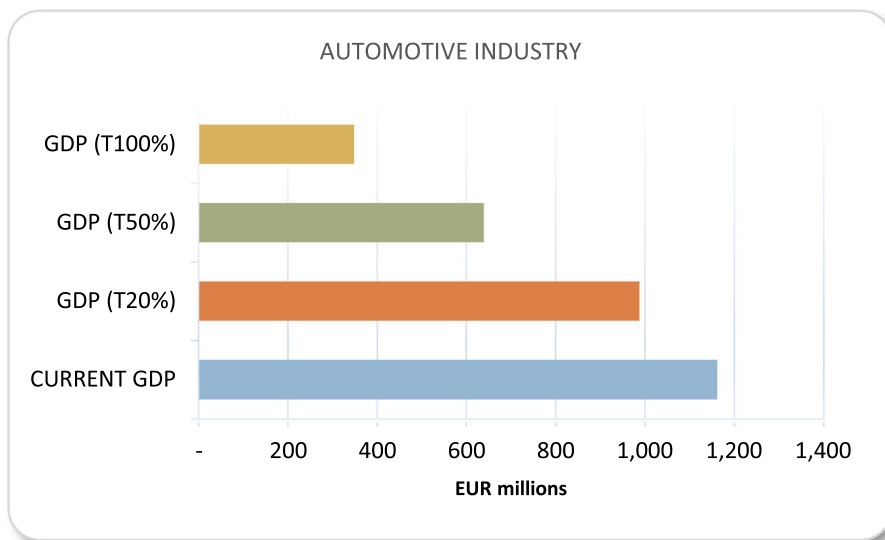
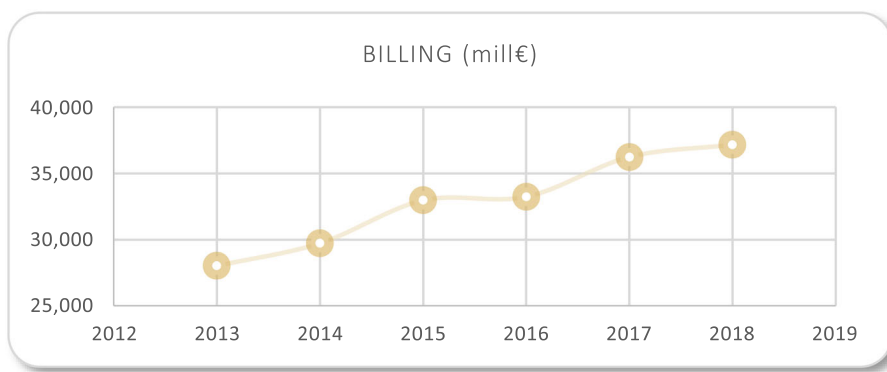


Fig. 6 Automotive Industry Spanish GDP forecast



Source: SERNAUTO, the Spanish association of auto suppliers.

Fig. 7 Billing of the Spanish equipment industry

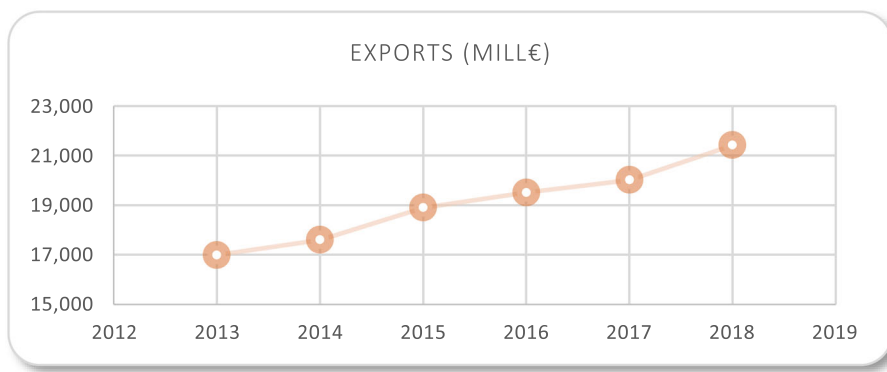
3.2.4 Passenger transport

The great beneficiaries of the new mobility model will be users, the people. And it is the main reason for this revolution, to improve the quality of life of our society. Currently, it is estimated that a person average travel in Spain is 41,6km per day [25]. With an autonomous mobility system, a new range of possibilities opens up for people who cannot use a vehicle, such as minors or the elderly, in addition to facilitating the possibilities of displacement in situations where it is tedious to move in a city due to traffic jams or parking. For these reasons, we estimate that this average distance per person will increase notably, it could double. In many cases, people do not move because they do not have an efficient mobility solution, or there are many inconveniences, such as parking, taxes, congestion, etc.

As Fig. 11 shows, currently, most of these travels are made in private vehicles [26]. The reality is that on many occasions the private vehicle is the only mobility solution. The new on-demand autonomous mobility model will bring these existing alternatives that do not exist today.

Technology is evolving and the concern for the environment and our health is also increasing. These concerns push into a change in our current way of moving that brings a new on-demand and shared services. Mobility will be cheaper, safer, and more efficient. This will allow higher displacements and will transform the current way of moving into an eco-friendly way of moving.

Current passenger transport contributes 8% of GDP, maintaining at the beginning of the transition, increasing to 25% in the middle and ending with an increase of 55% Fig. 12.



Source: SERNAUTO, the Spanish association of auto suppliers.

Fig. 8 The exports of the Spanish equipment industry

Table 2 GDP Forecast of all the industries analyzed along with this paper with the three scenarios proposed and their related GDP data in millions of euros

	Current GDP	Current GDP	Transition 20%	GDP (T20%)	Transition 50%	GDP (T50%)	Transition 100%	GDP (T100%)
Equipment industry	3%	35.805,99€	-5%	34.015,69 €	-10%	32.225,39 €	-16%	30.077,03 €
Goods transport	8%	93.305,52€	9%	101.703,02 €	26%	117.564,96 €	58%	147.422,72 €
No-life insurance industry	0.90%	10.496,87€	-5%	9.972,03€	-50%	5.248,44 €	-65%	3.673,90 €
Professionals concerned	0,27%	3.149,06 €	-10%	2.834,16 €	-44%	1.763,47 €	-85%	472,36 €
Technological industry	1.20%	13.995,83 €	25%	17.494,79 €	80%	25.192,49 €	160%	36.389,15 €
Health	1%	11.663,19 €	-23%	8.980,66 €	-60%	4.665,28 €	-90%	1.166,32 €
Passenger transport	8%	93.305,52 €	8%	100.769,96 €	25%	116.631,90 €	55%	144.623,56 €
Energy industry	2.50%	26.242,18 €	-24%	19.944,05 €	-55%	11.808,98 €	-98%	524,84 €
Repair and maintenance industry	3,47%	40.471,27 €	-3%	39.257,13 €	-10%	36.424,14 €	-15%	34.400,58 €
Automotive industry	10%	116.631,90 €	-15%	99.137,12 €	-45%	64.147,55 €	-70%	34.989,57 €
TOTAL	38,16%	445.067,33€	-	434.108,60€	-	415.672,59€	-	433.740,04€

3.2.5 No-life insurance industry

The No-life insurance industry (insurance industry less life insurance), especially the ones related to automotive, will be greatly affected. This relationship is mainly due to two factors: the drastic reduction in the fleet of vehicles, which implies that much less insurance will be hired, and the reduction in the number of accidents.

However, it is important to highlight that automotive insurance will have an important boom before its fall. This is due to an experimental phase that will conduct all the autonomous vehicles before their free-circulation and certification process. This will take place at the beginning of the transition, where the

insurance of an autonomous vehicle will be more expensive.

Likewise, another key point to explain this negative trend in the automotive insurance industry: Autonomous vehicles will reduce dramatically the accident rate, thanks to the removal of the human factor (a major cause of the accidents). In other words, a cut on the accident rate will suppose a decrease in cost insurance and insurance premiums, decreasing proportionally their benefit. Insurance rates go lower as less traffic translates to fewer accidents.

If we translate that information into data, it is obtained that the automotive insurance industry contributes

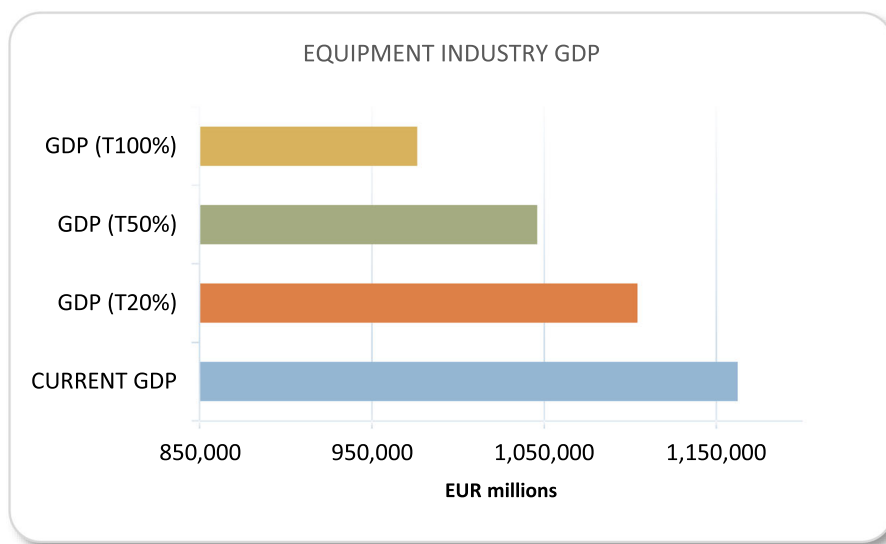


Fig. 9 GDP forecast of the Spanish equipment industry

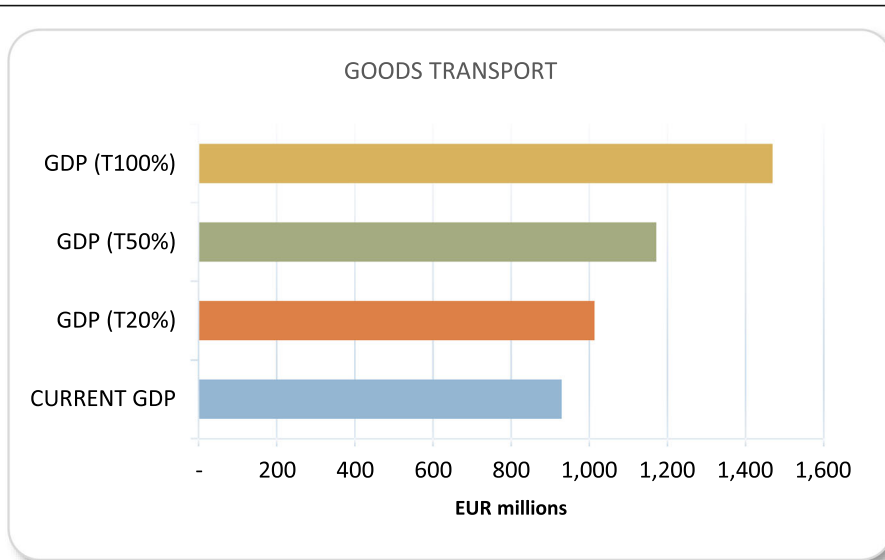


Fig. 10 Spanish GDP forecast for the goods transport industry

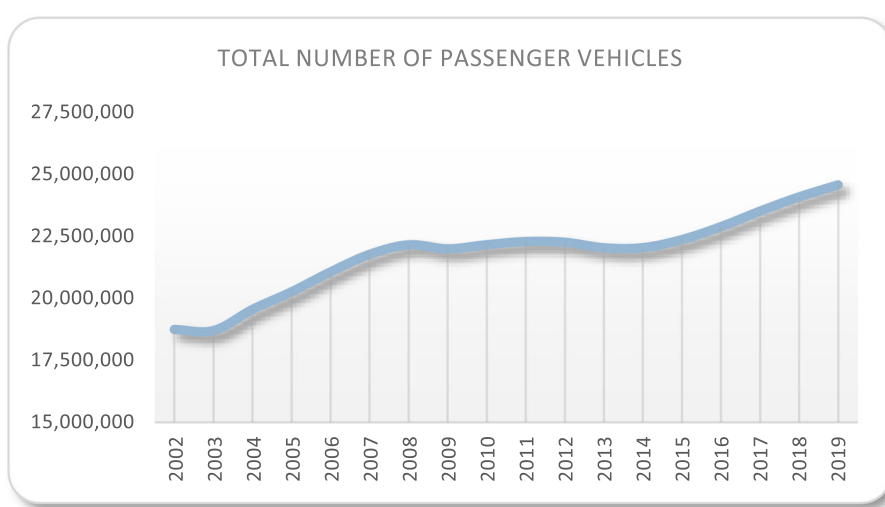
about 0,9% of GDP. Its drop will be 5, 50, and 65% respectively to each scenario Fig. 13.

3.2.6 Repair and maintenance industry

Inside this sector are encompassed workshops and repair and maintenance vehicles centers [27]. They will suffer big changes and will be affected directly by the intrusion of autonomous mobility. The vehicle repair market will be strongly affected due to a decrease in traffic accidents mentioned before. The maintenance vehicles market will remain to be necessary though it will be subject to

important changes. Currently, this sector contributes a 3,5% to GDP. At the beginning of the transition, it will decrease a 3% it will continue to fall until 15%.

New autonomous vehicles will increase their circulating time which means the necessity of regular reviews to complete their routes in perfect shape. Autonomous vehicles will be intelligent tanks to their AI will know when they need a review. Many workshops could retrain and carry out vehicle supervision and vehicle review [28]. In other words, play as fleet operators, who will take a great part in the current market.



Source: DGT, National Department of Traffic, (2019)

Fig. 11 The total number of passenger vehicles in Spain (2019 data)

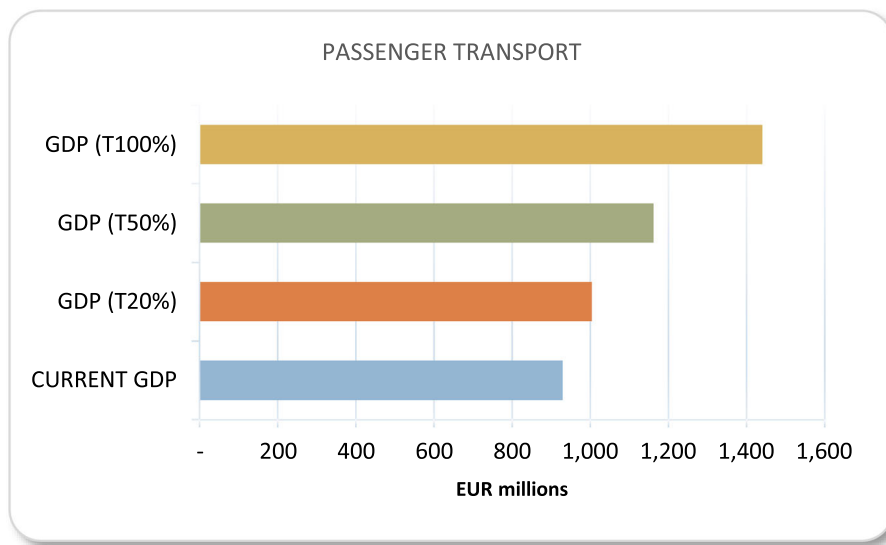


Fig. 12 GDP forecast for Spanish passenger transport

3.2.7 Professional concerned

This sector brings together driving professionals. One of the most outstanding features of an autonomous vehicle is that it does not need a driver. The trend in this sector is evident. Drivers are a profession that will disappear. It is very important to bet on the professional transformation of these people, to avoid great social dramas. However, some companies with ride-sharing mobility services will opt for on-board assistants for the passengers in the first stages of the transition. It is a professional profile of easy conversion.

At the beginning of the transition, a big change is not going to be distinguished. It is only expected a drop of 10% by GDP, more or less a proportional reduction of the vehicle fleet. Later stages will have a huge change. A reduction of 44% by GDP and a decrease of 85% by GDP at the end of the transition.

3.2.8 Technological industry

Autonomous and electric vehicles are very different from conventional ones. Hardware and software have an important role in these new vehicles, and therefore, there

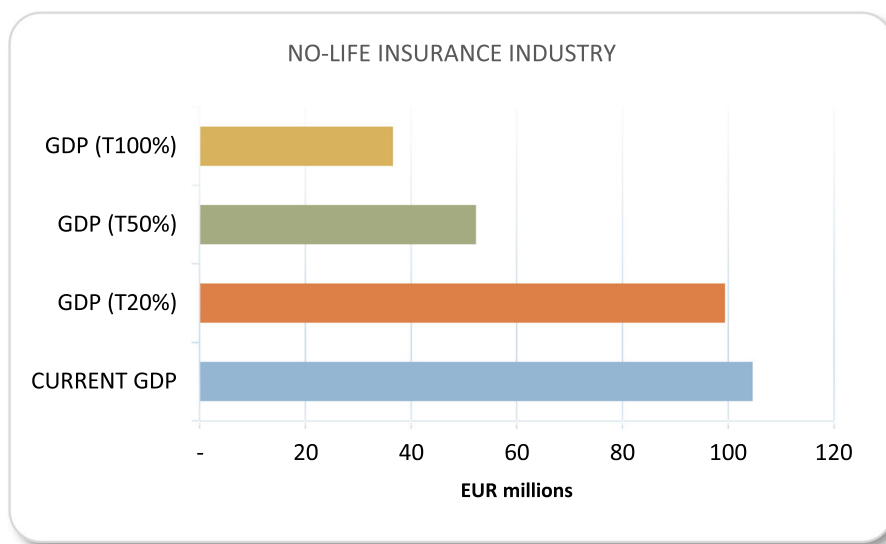


Fig. 13 GDP forecast of the Spanish no-life insurance industry

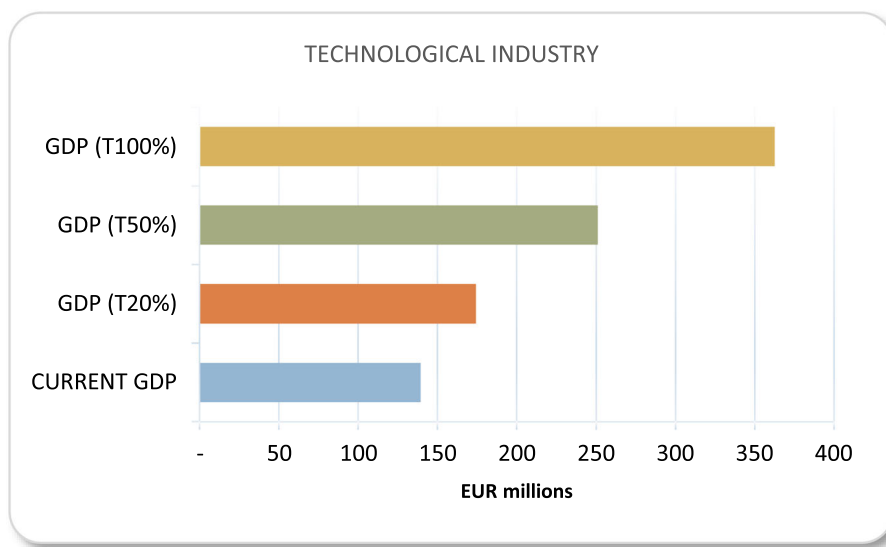


Fig. 14 GDP forecast of the Spanish technological industry

also will be great changes in the professionals who design them.

The automotive industry has to face a process of conversion, both technological and professional, which will require great financial efforts. A strong crisis is expected in the sector. On the other hand, an emerging industry has a simpler process, it only requires investment for research and development. Some of the most prominent actors in this new market will be emerging technology companies.

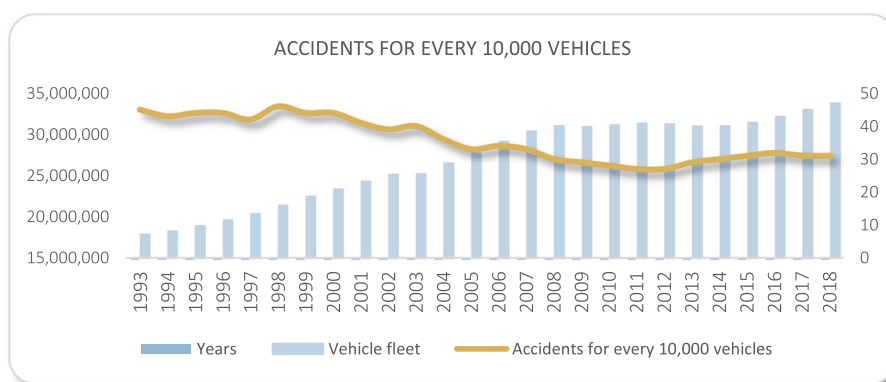
There will also be new business models that do not exist today. For example, telecom operators to service autonomous vehicles through V2X communications, or autonomous traffic management, through AI and Big Data techniques.

A new era where AI plays a critical role. This new technological sector requires a high investment at R&D, which means an important competitive advantage to the country. It is a great opportunity for Spain to position itself in this sector and bet for this GDP increase.

In terms of data, this sector contributes directly to GDP by €13,995 million (1.2%) and it employs over 219,234 people (1.3%) Fig. 14.

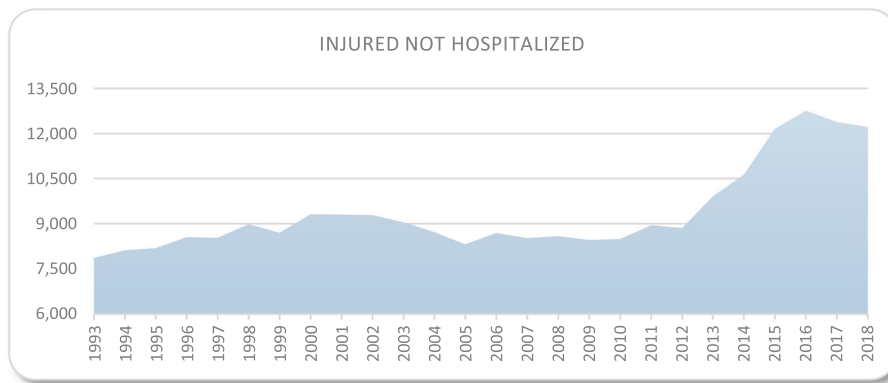
3.2.9 Health

Traffic accidents are a huge social drama. In addition to the fatalities, there are thousands of wounded every year, and many times we forget them. The medical services for all these people are a great economic cost for the country.



Source: DGT, National Department of Traffic, (2018).

Fig. 15 The accident number in Spain per 10,000 vehicles



Source: DGT, National Department of Traffic, (2018).

Fig. 16 The Number of injured not hospitalized in Spain (2018 data)

As Fig. 15 shows the rate of accidents has been reduced. The number of accidents has been reduced considerably in the last 20 years. But there comes a point where the figure stabilizes and it is very difficult to reduce it, due to the human factor, we are not perfect drivers. Autonomous driving technologies will solve this problem.

Although mortal accidents have decreased, it is important to point out that the number of injured not hospitalized has increased, as can be seen in Fig. 16. Due to technological development, there have been considerable medical advances that allow more survivors.

Another important point is that the main factor behind traffic accidents is the human factor. It will be eliminated with a reduction in the vehicle fleet and their replacement by autonomous ones. Spain has a

high accident rate. This change will suppose high cost-savings in health care and a decongestion in health service.

In data terms, at the beginning of the transition, a decrease of 23% is expected, becoming a - 60% in the middle and ending by a decrease of 90% Fig. 17.

3.2.10 Fossil fuels

The great success of the combustion vehicles during the last century has made the fossil fuel market become one of the most powerful.

In Figs. 18 and 19 gasoline and gasoil vehicles, fleet evolution can be seen. Although gasoil vehicles have a positive trend, nowadays people prefer gasoline, due to being less polluting.

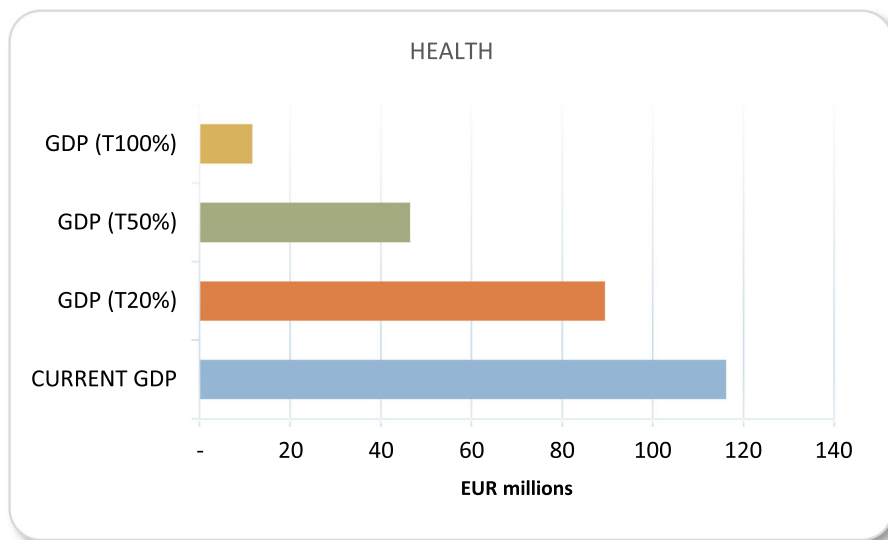
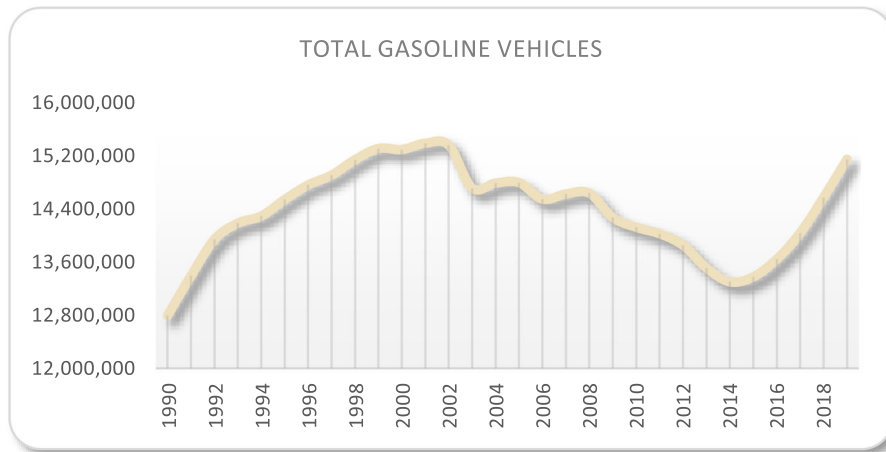


Fig. 17 GDP forecast of the Spanish health industry



Source: DGT, National Department of Traffic, (2019).

Fig. 18 Total gasoline vehicles fleet in Spain (2019 data)

The emergence of new clean propulsive systems has put this market in check. There is one very clear issue, people’s health is above any business model, no matter how powerful or consolidated it may be. Different governments in the world are already taking action Fig. 20. Spain announced the prohibition of combustion vehicles by 2040.

The conventional fossil fuel market will come to an end. It will be replaced by a new energy market, not negligible. Electric vehicles will be the majority, but we must not rule out other forms of clean propulsion, such as hydrogen or new successful research.

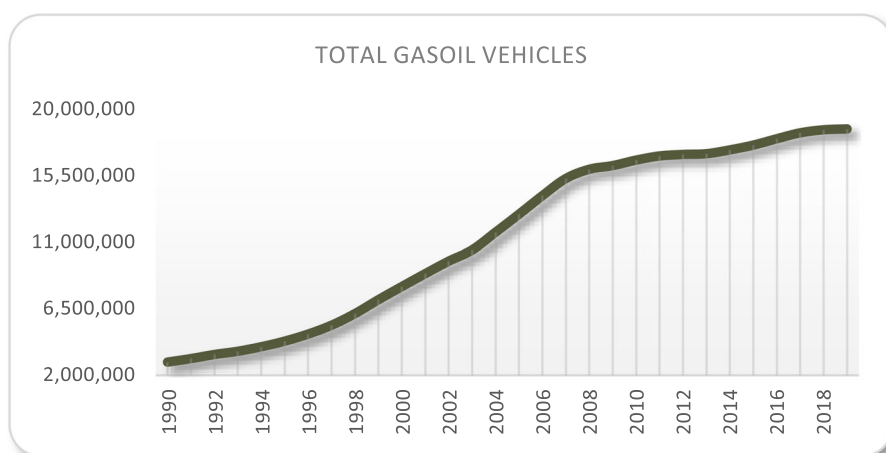
Currently, sector billing data are €30.000 million. The fossil fuel market will greatly decrease. In the beginning, it will decrease by 24% turn into 55% in the middle, and 98% at the end of the transition, according to the data

presented in Table 2. It will be an abrupt decrease directly associated with the decrease of the combustion vehicle fleet Fig. 21

Fossil fuel will still be necessary till the New Era of Transportation extend to maritime and air transport. Also, it will be necessary as a stand-energy in cases of force majeure and.

3.2.11 Infrastructure

The country’s infrastructure plays a very important role in transportation and autonomous mobility. Spain has a very high-quality road network and good connections. The new mobility model does not require the construction of new infrastructure, there may be some exceptions. However, what it does require is an adaptation of



Source: DGT, National Department of Traffic, (2019).

Fig. 19 Total gasoil vehicles fleet in Spain (2019 data)

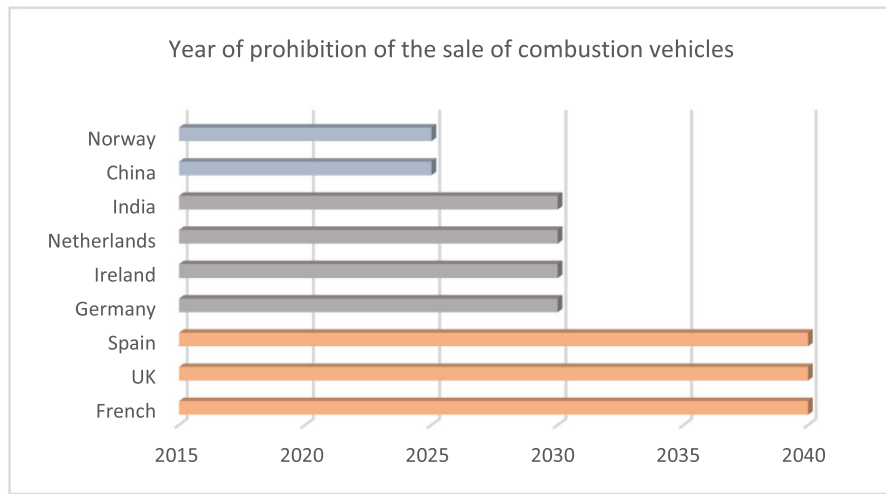


Fig. 20 Year of the prohibition of the sale of combustion vehicles

the existing infrastructure. It is necessary to add the intelligence layer to the current road network, a process known as ‘technification’. It is a process that consists of adding different elements that allow creating a secure V2X network nationwide. All existing routes may be reusable and are suitable for technification. This technification will allow us to convert these roads into smart roads where autonomous vehicles can circulate.

In financial terms, this is a great advantage over other technologies that require much higher investments at the national level. Maintenance costs will be maintained, and it will be very important to devote great attention to them.

As it can be seen in Fig. 22, technification cost is about twenty times lower than conventional road construction cost, and even forty times smaller than a highway construction cost.

3.2.12 Urbanism

The new era of transportation brings a new conception of cities. In the beginning, cities were designed for cars, as an exclusive item, which nowadays turns on a common item. A restructuring of cities is needed: The reduction of the vehicle fleet and the optimization of traffic flows will allow redefining a lot of space occupied

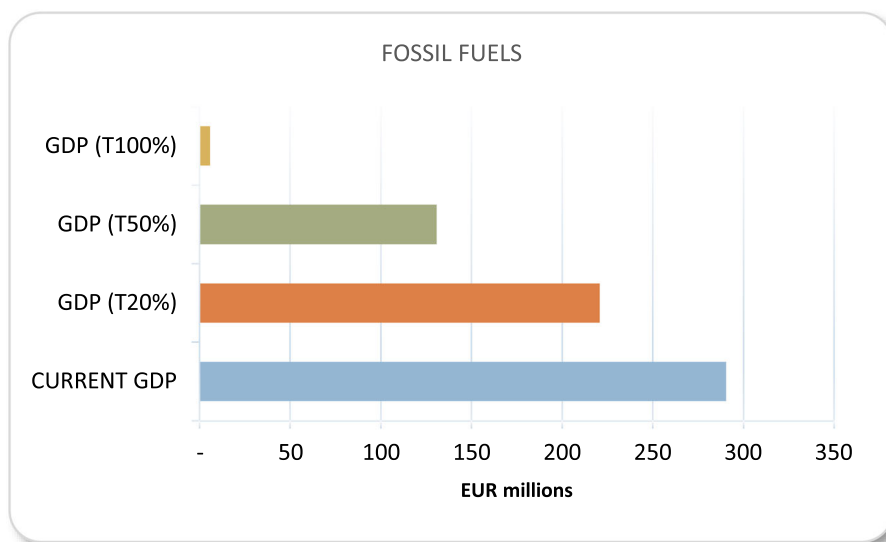


Fig. 21 GDP forecast of the Spanish fossil fuels energy industry

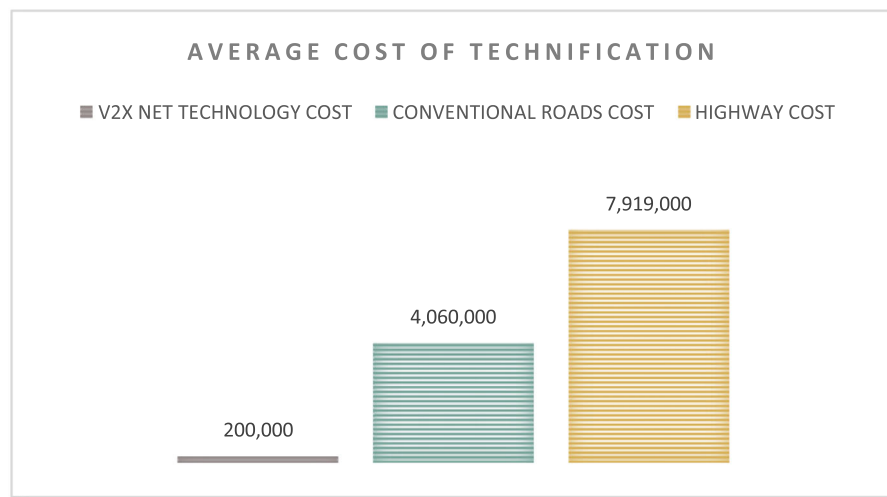


Fig. 22 The average cost of technification a road in Spain

today. In short, cities will be recovered for citizens, as a great civic asset.

Urban planning is a sector with a good growth forecast due to the consequences of autonomous mobility. Many of the city spaces occupied by vehicles, such as parking lots, will be converted into green-spaces or other assets that prioritize social welfare. In other words, these businesses will have to readapt cities to sustainable and Smart cities and bring technology closer to social welfare. Nowadays there are already many companies around the world working on it, such as Burohappold engineering, HRA, KPF, among others.

E-commerce creates the need to build numerous logistic centers in urban areas to satisfy the great demand for home delivery. This will be a very interesting business for the sector. Another of the urban consequences of autonomous mobility is the design of buildings with new functionalities. The last mile distribution with autonomous vehicles generates new needs, for example, a specific elevator for goods, either from the ground or from the roof (there will also be autonomous drones).

4 Conclusions

Autonomous vehicles are in the last stages of technological development, with their entry into the market ever closer. This manuscript aims to analyze from a global point of view the impact of this phenomenon on the Spanish economy.

Firstly, it is mandatory that governments start preparing a step-by-step plan at an economic, technological, and social level, which allow enterprises to prepare themselves for autonomous vehicles inclusion. Furthermore not only for businesses but for governments also

to take appropriate measures from the start. Big investments would be needed, but preparing in advance for this change will allow any country to be placed as one of the leaders in this revolution. This plan will be a key point for the adaptation and survival of all industries affected to minimize damage and avoid social dramas. To make this possible, a long-term study needs to be carried out because analyzing only the early stages of the transition brings a lost in the global perspective of the change.

Secondly, the way we live today and the way we move will be totally changed. Transportation will transform into a model based on fleet operators with on-demand ride-sharing services affecting in a current mobile park. The decrease in the number of private vehicles and an increase in those for shared use, the direct consequence is a benefit for widespread traffic efficiency. Accidents will be decreased, as well as the movement of freight transport and consumer price index, translating into a lower cost for citizens. The new mobility model may offer cheaper solutions that we have today. The revolution could be summed up in a model of safe, sustainable, and efficient mobility, with more disposable income per inhabitant.

Thirdly, it is very difficult to find a commercial or economic activity that is not affected to a greater or lesser extent by this change. The automotive industry and the oil industry are the most affected in macro terms by this revolution. Their business models are reaching a turning point, and although they have been protecting by governments over time, they have already assumed that they must act. Undoubtedly, the health and safety of people are above commercial interests.

Abbreviations

NERTRA: New era of transportation; NLP: Non-Law Proposition; ARIMA model: Autoregressive integrated moving average model; MaaS: Mobility as a service; GDP: Gross Domestic Product; R&D: Research and Development; DGT: National Department of Traffic; INE: National institute of statistics; V2X: Vehicle to everything communications; AI: Artificial intelligent

Acknowledgments

The authors thank the results of this study to the DROTUM team for the support received during its development, and respective research groups of the University of León that have collaborated.

Authors' contributions

EF: He was leading the research team. He wrote the article with the data and contributions provided by the following authors. CA: She was in charge of the treatment of the data in the study and the realization of the numerical forecasts. MG: She was in charge of the data collection process and the analysis of this data and the impact factors in the different sectors analyzed. RF: He was responsible for reviewing the article and advised on changes. MN: He was responsible for reviewing the article and advised on changes. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This research project was financially supported by a private company, Drotium.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Author details

¹Drotium, a Mobility Company, Avenida de los Jesuitas 13, 24007 León, Spain. ²University of León, School of Industrial Engineering and Information Technology, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, Spain. ³University of León, Economy and Business Management, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, Spain.

Received: 15 January 2020 Accepted: 20 October 2020

Published online: 31 October 2020

References

- Thurn, S., P. M. S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., ... Christia (2006). Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge. *Journal of Field Robotics*, 23(6), 661–692.
- Waymo (2018). *Millions of miles driven*. [Online]. Available: <https://waymo.com/ontheroad/>. Accessed 17 Apr 2018.
- Guerreiro, C., Ortiz, A. G., de Leeuw, F., Viana, M., Horálek, J. (2016). Air quality in Europe-2016 report. Publications Office of the European Union.
- Directorate General for Traffic (2016). *Las principales cifras de la Siniestralidad Vial España 2016*.
- WHO (2013). *Global status report on road safety 2013*, (pp. 1–12). Geneva: World Health Organization.
- U.S. Department of and N. H. T. S. A. Transportation (2008). *National motor vehicle crash causation survey report to congress*.
- Cookson, G., & Pishue, B. (2018). *INRIX global traffic scorecard*.
- European Environment Agency (2016). *Electric vehicles in Europe*.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167–181.
- Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., & Marrs (2013). *Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy*, (p. 163). New York: McKinsey Global Institute.
- Lanctot, R. (2017). Accelerating the future: the economic impact of the emerging passenger economy autonomous. *Autonomous Vehicles Services*, no. June, pp. 1–30.
- D. G. de T. (DGT) (2015). *Instrucción 15/V-113: Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general*.
- C. de C. y León. (2019). *Ley 9 / 2018 , de 20 de diciembre , de transporte público de viajeros por carretera de Castilla y León*. Sapin, pp. 1–42.
- Clements, L. M., & Kockelman, K. M. (2017). Economic effects of automated vehicles. *Transportation Research Record*, 2602, 1–19.
- Abugaber, D. (2020). *Chapter 23: using ARIMA for time series analysis*. [Online]. Available: <https://ademos.people.uic.edu/Chapter23.html>. Accessed 29 June 2020.
- Hasenjager, M., & Wersing, H. (2018). Personalization in advanced driver assistance systems and autonomous vehicles: a review. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (pp. 1–7).
- OICA (2016). *Sales statistics 2005–2015*. Paris: OICA [Online]. Available: <http://www.oica.net/category/sales-statistics/>. Accessed: 29 June 2020.
- Arbib, J., & Seba, T. (2017). *Rethinking transportation 2020–2030*.
- Alonso-mora, J., Samaranyake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., & Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(3), 462–467.
- Van Meldert, B., & De Boeck, L. (2016). *Introducing autonomous vehicles in logistics: a review from a broad perspective*.
- Instituto Nacional de estadística (2020). *Base de datos del Instituto Nacional de Estadística*. Ourense: INE [Online]. Available: <https://www.ine.es/inebmenu/indiceAZ.htm>. Accessed 29 June 2020.
- SERNAUTO. *Sector del Automóvil | SERNAUTO Proveedores de Automoción*. [Online]. Available: <https://www.sernauto.es/el-sector>. Accessed 27 Oct 2019.
- CNMC Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (2018). *El comercio electrónico supera en España los 10.000 millones de euros en el tercer trimestre de 2018, casi un 30% más que el año anterior*. [Online]. Available: <http://data.cnmc.es/datagraph/>. Accessed: 04 Oct 2019.
- Scherf, J. & T. Knell (2019). *What is Logistics 4.0? Everything you need to know about digitization & logistics*. MM Logistick. [Online]. Available: <https://www.maschinenmarkt.international/what-is-logistics-40-everything-you-need-to-know-about-digitization-logistics-a-876611/>. Accessed 28 Oct 2019.
- Sanz, A., Vega, P., & Mateos, M. (2014). *Cuentas ecológicas del transporte*, (2nd ed.,). Madrid: Ecologistas en Acción.
- Dirección General de Tráfico (2017). *Portal Estadístico - Número de pasajeros totales en España*. [Online]. Available: https://sedeapl.dgt.gob.es/WEB_IEST_CONSULTA/. Accessed 28 June 2020.
- CETRAA (Confederación Española de Talleres de Reparación de Automóviles y Afines) (2020). *Nota De Prensa*. [Online]. Available: <https://www.cetraa.com/acerca-de/>. Accessed 29 June 2020.
- SafeWork SA (2017). *Automotive workshops - work health and safety guidelines*.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen® journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)