

# Talleres Prospectiva Transporte 2050

**ORGANIZAN:**

**CON EL APOYO DE:**

## TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

25 de febrero de 2025

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	3
ENFOQUE DEL TALLER .....	4
PANORAMA ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS HABILITADORAS .....	5
Tecnologías de Navegación, posicionamiento y sincronización .....	5
Ciberseguridad .....	6
Conectividad 5G y Edge Computing .....	6
Autonomía.....	7
Sensores y tecnologías emergentes.....	9
Digitalización e Inteligencia Artificial .....	10
VISIÓN DE LOS EXPERTOS PARA 2050.....	10
Navegación por satélite.....	10
Ciberseguridad .....	11
Autonomía.....	12
Comunicaciones .....	13
RETOS Y OPORTUNIDADES.....	14
Retos tecnológicos .....	14
Retos normativos .....	15
Retos económicos y sociales .....	16
Oportunidades .....	17
PROPUESTA DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS.....	19
CONCLUSIONES .....	19

## INTRODUCCIÓN

En el contexto de los compromisos asumidos por España en materia de sostenibilidad y transición ecológica, la Subdirección General de Eficiencia y Acceso a la Energía (SGEAE), del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, impulsó en 2024 un ejercicio de prospectiva sectorial con el objetivo de visualizar el futuro del transporte hacia el horizonte del año 2050. Este trabajo se enmarca en los objetivos recogidos en la Estrategia Española de Descarbonización a Largo Plazo y pretende contribuir al cumplimiento de las metas establecidas por la Unión Europea en materia climática.

Durante el proyecto, se realizaron diez talleres temáticos —cada uno enfocado en un modo de transporte o en un aspecto estratégico relevante— con la presencia de expertos de distintos sectores para identificar barreras y oportunidades y promover sinergias intersectoriales. El presente informe recoge las aportaciones del segundo taller centrado específicamente en las tecnologías habilitadoras para el desarrollo del transporte del futuro.

**Tecnologías habilitadoras.** La descarbonización es el principal factor que va a dirigir la evolución del transporte. El desarrollo de tecnologías que permitan la electrificación de los motores, el uso del hidrógeno o la producción de combustibles sintéticos (e-fuels) será esencial y así se ha considerado en este proyecto en el que se ha abordado este tema con detalle en varios talleres.

Pero hay otras tecnologías que también serán clave en el horizonte del 2050. La visión del transporte en ese horizonte es que, además de sostenible, sea también una **red interconectada e inteligente** que permita la movilidad autónoma y la intermodalidad para optimizar el uso de los medios de transporte en cada ámbito de aplicación y asegure una transición fluida entre los distintos modos.

Para conseguir estas funcionalidades, serán necesarias la **digitalización, la navegación por satélite, las comunicaciones, las tecnologías de autonomía y las infraestructuras integradas** e inteligentes que, además, contribuirán a reducir las emisiones al aumentar la eficiencia de los trayectos. La **ciberseguridad** debe también considerarse para asegurar la robustez y resiliencia de estos desarrollos.

Estas tecnologías permitirán, incluso, cambiar los modelos de negocio en los que ya no será necesaria la propiedad de los medios de transporte (modelos MaaS: “Mobility as a Service”)

Las tecnologías que permitirán estos desarrollos son las que se consideran en este taller.

**Organización del taller.** El taller fue organizado por la Plataforma Tecnológica Aeroespacial Española (PAE) y la Plataforma Tecnológica de Eficiencia Energética (PTE-ee). La coordinación técnica estuvo a cargo de Guillermo J. Escobar (PTE-ee), Andrés Catalán (PAE). La sesión se celebró el día **25 de febrero de 2025** en formato virtual, y contó con la presencia de expertos en ciberseguridad, navegación por satélite, movilidad autónoma, comunicaciones e infraestructuras tanto de la industria como de la academia y centros tecnológicos.

**Objetivo del informe.** Este informe tiene como objetivo principal sintetizar las aportaciones de los expertos participantes, estructurando sus intervenciones en torno a una visión conjunta de la evolución de estas tecnologías. A través de un enfoque multidisciplinar, se analizan los avances tecnológicos esperados, los retos normativos y económicos que enfrenta el sector, y las

oportunidades emergentes que podrían consolidar a España como actor relevante en estas tecnologías lo que ofrecería grandes oportunidades de mercado a nivel global.

Se pretende además que este documento sirva como herramienta útil para los siguientes propósitos:

- Informar a **administraciones públicas** sobre las necesidades estratégicas del sector con vistas a mejorar el diseño regulatorio.
- Orientar a **entidades financiadoras** en la definición de convocatorias y programas de apoyo a la innovación.
- Apoyar a **desarrolladores tecnológicos** en la planificación de agendas de investigación y desarrollo.
- Fomentar la **colaboración intersectorial**, superando la fragmentación y el trabajo en silos.

El contenido del informe se ha estructurado en función de los temas tratados, priorizando una representación fiel y enriquecida de cada perspectiva experta.

## ENFOQUE DEL TALLER

Con un formato abierto y colaborativo, se empleó la técnica de debate moderado entre expertos, que permitió combinar exposiciones individuales con intercambios espontáneos.

El encuentro fue grabado íntegramente para facilitar la elaboración del presente informe y poder extraer con precisión los contenidos tratados. La transcripción íntegra servirá como fuente principal para la sistematización de ideas.

### Entidades organizadoras

La convocatoria y dinamización del taller estuvo a cargo de dos plataformas tecnológicas que actuaron como nexo intersectorial.

- Plataforma Tecnológica Aeroespacial Española (PAE)
- Plataforma Tecnológica de Eficiencia Energética

La participación conjunta de estas entidades refleja la vocación transversal del proyecto, donde se entrelazan los sectores de la energía y el transporte.

### Perfil de los participantes

El taller reunió a representantes experimentados de los sectores de las comunicaciones, transporte, navegación por satélite, ciberseguridad e infraestructuras. A continuación, se enumeran los perfiles invitados.

PROSPECTIVA DEL TRANSPORTE 2050  
TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

Nombre	Entidad / Rol	Sector
Guillermo J. Escobar	Coordinador Técnico	Energía / Eficiencia
Andrés Catalán	Plataforma Aeroespacial	Aeronáutico
María Jesús López	Universidad Carlos III de Madrid. Moderadora	Catedrática de ingeniería mecánica
Ana Cezón	GMV	Navegación
Antonio Hernández	GMV	Ciberseguridad
Antidio Viguria	CATEC. Director de sistemas	Autonomía
Mas Hernández	Vodafone Business	Movilidad conectada
Maite Fernández Peña	CIDAUT. Responsable de innovación	Innovación en el transporte
Mónica Pelegrín	ADIF	Ferrocarril
Eva Ramírez	INECO	Infraestructuras
Jorge Villagra	CSIC – Centro de Automática y Robótica	Movilidad autónoma

La variedad de los ponentes permitió abordar la temática con una visión multidisciplinar

## PANORAMA ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

Estas tecnologías, que hemos llamado habilitadoras para el transporte del 2050 están en diferentes estados de madurez.

A continuación, presentamos las principales características:

### Tecnologías de Navegación, posicionamiento y sincronización

Estas tecnologías son fundamentales para el transporte actual y, en particular, para los sistemas autónomos.

**Europa líder en geolocalización.** Galileo es el sistema europeo de posicionamiento, navegación y sincronización (PNT) de alta precisión complementando y mejorando el GPS estadounidense con una constelación de satélite propia y una infraestructura terrestre que garantiza la independencia y soberanía europea en geolocalización. Europa cuenta también con el sistema EGNOS para mejorar la precisión, disponibilidad e integridad de los sistemas de navegación por satélite (GPS, y ruso GLONASS y el propio Galileo). Se utiliza en la actualidad en la aviación y transporte marítimo.

España tiene un papel relevante en estos sistemas (en especial la empresa GMV, que lidera el segmento terreno)

Estos sistemas han alcanzado un nuevo nivel de exactitud con la puesta en marcha del servicio HAS (High Accuracy Service) alcanzando precisiones de centímetros sin depender de infraestructura terrestre local.

**Implantación en coches autónomos.** La madurez de este ecosistema se refleja en aplicaciones con seguridad certificada, como el sistema “Search” de GMV que se integra en vehículos autónomos de BMW para garantizar precisión y seguridad.

**Próximo paso: LEO PNT.** Se están empezando a lanzar proyectos tecnológicos para un inminente despliegue de capacidades PNT con mayor precisión y baja latencia mediante constelaciones de órbita baja. Esta configuración mejorará la resiliencia y la sincronización temporal para infraestructuras críticas, marcando el siguiente paso hacia una infraestructura global más robusta.

## Ciberseguridad

Ante la mayor digitalización y uso de comunicaciones es necesario disponer de protección frente a las amenazas del ciberespacio

**El transporte en la diana.** El transporte es, actualmente, el segundo sector más atacado en la Unión Europea (11% de los incidentes). El “ransomware y la filtración de datos son la principal amenaza y no sólo afecta a la privacidad sino a la logística de la UE. Por tanto, la ciberseguridad en el transporte ya no es una cuestión de parches sino de resiliencia operativa estructural.

**Normativa.** La normativa europea impone los desarrollos tecnológicos para su cumplimiento:

- El **Reglamento de Ciberresiliencia (CRA)** ya está en vigor desde finales de 2024, otorgando a los fabricantes un periodo de tres años (hasta 2027) para adaptarse. Cualquier desarrollo de producto o hardware debe integrar ya el “Security by design”. Cada objeto conectado en la red de transporte deberá cumplir con el reglamento en este período.
- **Transposición nacional:** En España, la directiva **NIS2** se encuentra en fase de anteproyecto de ley, habiendo finalizado su periodo de consultas en febrero de 2025. Para las aplicaciones de transporte (logística, ferroviario, aviación), esto significa que la ciberseguridad ha pasado de ser un gasto de IT a una responsabilidad del consejo de administración. El reporte de incidentes significativos en menos de 24 horas es obligatorio, y las sanciones por incumplimiento están forzando a las empresas a auditar no solo su código, sino toda su cadena de suministro de software (SaaS/APIs).

## Conectividad 5G y Edge Computing

El transporte del futuro estará interconectado. Los vehículos se hablarán con la infraestructura y otros vehículos. Ante esto, los desarrollos en comunicaciones son esenciales.

**Edge Computing y redes 5G.** Esta arquitectura es muy importante para que las redes 5G puedan soportar el transporte inteligente y conectado y la movilidad autónoma porque permite procesar datos muy cerca de la vía o la infraestructura con latencias muy bajas (milisegundos). Lo que sería imposible si el procesado se lleva hasta centros de datos lejanos. Esto permite maniobras cooperativas entre vehículos o la gestión dinámica y predictiva del tráfico.

El despliegue es desigual. Actualmente existen nodos de **Edge Computing** activos en países como Alemania y Reino Unido, donde se logran latencias de **10 milisegundos**, lapso que permitiría enviar instrucciones de emergencia para el frenado de un tren o vehículo autónomo

**Despliegue del 5G.** En España y el resto de Europa, la cobertura 5G robusta sigue siendo un reto, especialmente en **zonas rurales** y desfiladeros ferroviarios que presentan "zonas de sombra".

**Prioridad actual:** El enfoque institucional está en cubrir primero los **corredores transeuropeos** de transporte.

## Autonomía

Los vehículos autónomos en carretera, ferrocarril, marinos y aéreos serán habituales en el futuro. En la actualidad, se están empezando a desplegar de sistemas autónomos en los diferentes modos de transporte con diferentes niveles de autonomía.

### Tráfico aéreo

El tráfico aéreo de hoy en día ya disfruta de un alto grado de automatismo. Siguen rutas establecidas de antemano y la operación puede ser completamente automática desde el despegue hasta el aterrizaje. Siempre supervisados por la tripulación

Los sistemas actuales no tienen una conciencia del entorno y no pueden reaccionar frente a sucesos inesperados.

La tendencia es que el grado de autonomía vaya aumentando en el futuro, empezando con operaciones con un solo piloto. Los avances y experiencias que se vayan obteniendo con drones serán muy útiles en esta evolución.

### Movilidad Aérea Innovadora (Drones y VTOL)

Los drones son vehículos automatizadas (como las aeronaves comerciales mencionadas, siguen rutas programadas mediante sistemas de navegación GPS) pero carecen de conciencia del entorno para tomar decisiones autónomas ante imprevistos.

Las aplicaciones logísticas (entrega de paquetes) ya están operativas, con drones pilotados en remoto. Los servicios se ofrecen en la actualidad en zonas rurales no muy pobladas. Los casos de uso los aprueba AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) en función del riesgo que entraña la operación. En zonas urbanas más pobladas el riesgo es mayor y las aprobaciones son más lentas. En zonas urbanas, además, se debe adecuar la infraestructura terrestre para permitir estos servicios y es necesaria una participación muy activa del municipio.

Esto es particularmente relevante en el caso de aerotaxis (vehículos VTOL para realizar servicios dentro de ciudades o entre municipios no muy distantes). En esta aplicación, además de los problemas técnicos de las aeronaves se acentúa los aspectos de seguridad aérea y el papel de las ciudades para regular el desarrollo e implante de vertipuertos.

Este panorama conduce a una importante brecha competitiva. Mientras que **China** cuenta ya con un sistema de aerotaxi certificado y sin piloto (EHang), en Europa y EE. UU. la regulación actual es mucho más conservadora y dicta que estas aeronaves deberán ser **pilotadas** al menos hasta 2030-2035 y los procesos de certificación son mucho más lentos.

Esto ha ocasionado que grandes empresas europeas del sector, como Lilium o Volocopter con sistemas muy prometedores, atraviesen dificultades financieras severas que las han llevado a interrumpir sus operaciones.

Estos sistemas podrán volar mediante una gestión inteligente del tráfico aéreo, ATM y u-space, este último en avanzado estado de desarrollo gracias a diferentes proyectos europeos de Horizonte Europe (SESAR). Estos sistemas permitirán el uso compartido del espacio aéreo entre las aeronaves tripuladas y no tripuladas de forma automática. En este ámbito, la posición de la industria española es muy relevante (empresas como INDRA, centros tecnológicos como CATEC o universidades como la Politécnica de Valencia)

### **Vehículo Autónomo Terrestre**

Los coches autónomos ya son una realidad comercial en ámbitos muy concretos (robotaxis y lanzaderas en algunas ciudades) pero los turismos privados totalmente autónomos siguen lejos de ser algo masivo, por más que el marketing de algunas empresas (Tesla) quieran dar otra imagen. En la actualidad, la mayoría de estos coches siguen en el nivel de conducción asistida (sistemas avanzados de control de crucero, centrado en el carril o frenada automática) y requieren la atención constante y responsable del conductor. Los sistemas “Full Self-Driving” de Tesla es, en la práctica, técnicamente, un sistema de conducción asistida (nivel 2)

Los servicios actuales de robotaxi se realizan de forma piloto en varias ciudades de EEUU (la compañía Waymo en Arizona y California) y en varias ciudades chinas. La tecnología, sin embargo, no es aún estable, con una tasa alta de desconexiones (momentos en que el humano debe tomar el control), especialmente en entornos urbanos

El despliegue de estos sistemas se enfrenta a problemas de seguridad y confianza pública debido a diversos accidentes ocurridos lo que ha obligado a estrictos procesos de certificación y supervisión.

El marco legal también es una barrera. Los estados tienen posiciones diferentes sobre la responsabilidad en caso de accidente lo que complica el seguro de los vehículos y dificulta la expansión masiva del mercado.

Por último, el coste sigue siendo un obstáculo importante cuando, además, los sensores evolucionan mucho más rápido que la duración de la plataforma (el hardware queda obsoleto en 3 o 4 años) lo que obliga a diseñar vehículos definidos por software para permitir actualizaciones constantes.

### **Navegación marítima autónoma**

Los sistemas autónomos en el transporte marítimo están en fase de transición. Existen programa pilotos con operaciones restringidas (remolcadores, ferris, buques costeros), pero no existe un despliegue en rutas oceánicas, La regulación global no será obligatoria hasta después de 2030.

La Organización Marítima Internacional lleva años tratando de encajar los sistemas autónomos en los convenios existente. Esta previsto empezar con una regulación no obligatoria hasta 2030 como paso previo a una obligatoria después de 2030 que complemente las regla actuales sin sustituirlas.

La mayoría de pruebas y primeras operaciones comerciales se concentran en vías interiores, puertos, ferris de corto recorrido, remolcadores y servicios auxiliares, donde el entorno es más controlable y la autoridad local puede autorizar experimentos.

En el segmento de remolcadores y operaciones portuarias se están introduciendo funciones semiautónomas (maniobras asistidas, automatización de equipos de cubierta, optimización de rutas) junto a electrificación y combustibles alternativos.

### **Sistemas autónomos en el ferrocarril**

Los sistemas autónomos en el ferrocarril ya están bastante maduros en metro y cercanías, y están empezando a entrar en regional, alta velocidad y carga, empujados por la digitalización y automatización de la señalización y el control. Se espera que el mercado siga creciendo con fuerza durante esta década, con una automatización cada vez mayor de la conducción, el control de tráfico y el mantenimiento.

Se está introduciendo también sistemas avanzados como el ERTMS (European Rail Traffic Management System), donde la navegación por satélite será clave para la localización precisa de los trenes, permitiendo conceptos innovadores como las “balizas virtuales”. Para garantizar la máxima robustez, se prevé una hibridación de sistemas de posicionamiento, que fusiones el 5G con la navegación por satélite.

## **Sensores y tecnologías emergentes**

El transporte del 2050 se apoyará en una combinación de sensores a bordos de los vehículos, en la infraestructura y en la cadena logística, conectados mediante IoT y gestionados con IA para mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad. Se consolidarán las familias de sensores existentes (cámaras, radar, lidar, GNSS, inerciales) y aparecerán tecnologías emergentes para sensores inteligentes de estado de vehículo, entorno urbano y de la mercancía.

### **Sensores en el vehículo.**

- Conciencia del entorno: cámaras de alta resolución, radar, lidar
- Localización y movimiento: GNSS avanzado, unidades inerciales, algoritmos de posicionamiento, mapas HD (Alta definición)
- Sensores de estado del vehículo

### **Sensores en la infraestructura**

- Sensores viales para contar vehículos, medir velocidad, detectar incidentes y gestionar peajes
- Ambientales: estaciones meteorológicas en tiempo real para gestionar límites de velocidad en función de las condiciones climáticas.
- Sensores estructurales en puentes y túneles
- Nodos V2X (Vehicle-to-everything) para comunicar con los vehículos para compartir información sobre semáforos, obras, accidentes o aparcamientos

#### Logística y operación (transporte de mercancías)

- Sensores de carga: temperatura, humedad, vibración, geolocalización para la cadena de frío, mercancías sensibles, prevención de robos
- Sensores de flota: IoT en camiones, buses y furgonetas para monitorizar rutas, consumo, mantenimiento predictivo
- Sensores energéticos: medición en tiempo real de consumo, regeneración y estado de carga de baterías eléctricas

#### Tendencias tecnológicas:

- Mapas hiperprecisos y actualización dinámica mediante observación de la Tierra.
- Sensores cuánticos, criptografía cuántica y computación cuántica.
- Navegación alternativa (muones, neutrinos, inerciales avanzados).
- Fusión multisensor para transporte autónomo.

### Digitalización e Inteligencia Artificial

Hay diferentes soluciones de digitalización que harán el transporte más eficiente y fiable. Los gemelos digitales permitirán trabajar con modelos predictivos que optimizarán el mantenimiento de los sistemas (estimando cuándo fallará un componente).

La adopción generalizada de la IA afectará también al transporte, con sus propios retos.

En conclusión, el estado actual de estas tecnologías es el de un **puzzle a medio completar**: ya tenemos algunas piezas maestras (como los satélites Galileo), pero todavía faltan las conexiones robustas (5G total) y el marco legal para que todas las piezas encajen de forma segura.

## VISIÓN DE LOS EXPERTOS PARA 2050

### Navegación por satélite

**Ana Cezón Moro** (Experta en Navegación por Satélite en GMV) se centró en una **navegación por satélite (GNSS) resiliente y robusta**, que será la pieza clave para el transporte autónomo e intercomunicado. El futuro de estos sistemas está marcado por el concepto de “Resilient PNT (Pointing, Navigation, Timing), es decir, poniendo el foco no sólo en precisiones de centímetros, sino en garantizar la seguridad (“security”), la fiabilidad (“safety”) y la robustez del sistema frente a interferencias, tanto accidentales como intencionadas.

Para 2050, prevé:

- **Nuevas constelaciones:** El despliegue de **constelaciones de órbita baja (LEO PNT)** complementando los sistemas como Galileo, ofreciendo menor latencia, redundancia y mayor resiliencia al sistema global de navegación. Posiblemente una tercera generación de Galileo dará, aún, mayores prestaciones

- **Tecnologías disruptivas:** El uso de **tecnologías cuánticas** (computación, encriptación y sensores) que, aunque complejas, podrían estar operativas para esa fecha.
- **Sincronización:** Una garantía total en la sincronización de tiempos para infraestructuras críticas.
- **Multimodalidad:** Un sistema hiperconectado donde el espacio incluso se utilice para **transporte ultrarrápido (turismo espacial)**.

## Ciberseguridad

**Antonio Hernández Bajo** (Experto en Ciberseguridad en GMV) mantiene una perspectiva pragmática, señalando que, aunque habrá revoluciones, muchos elementos físicos (aviones o barcos) podrían no cambiar radicalmente, como ha ocurrido en los últimos 25 años.

En un ecosistema hiperconectado, la ciberseguridad deja de ser un complemento para convertirse en un pilar fundamental. El sector del transporte ya es el **segundo más atacado** por ciberincidentes, siendo el **ransomware** la amenaza predominante. Para hacer frente a esta vulnerabilidad creciente, la Unión Europea ha desplegado un nuevo marco legislativo con un impacto directo y profundo:

- **Directiva NIS 2:** Eleva y homogeneiza el nivel de ciberseguridad exigido a las entidades críticas, incluyendo a los operadores de transporte. Les obliga a implementar una gestión de riesgos proactiva, a notificar incidentes graves de forma inmediata y, de manera crucial, a asegurar la ciberseguridad a lo largo de toda su cadena de suministro.
- **Cyber Resilience Act (CRA):** Esta normativa actúa como un "**mercado CE de ciberseguridad**" para todos los productos con componentes digitales. Impone a los fabricantes de hardware y software la obligación de integrar la seguridad desde la fase de diseño (*security by design*) y de gestionar las vulnerabilidades durante todo el ciclo de vida del producto, garantizando un nivel de protección básico. **Para el sector del transporte, esto significa que cada sensor, unidad de control o sistema de software integrado en un vehículo, aeronave, tren o buque deberá cumplir con unos estándares mínimos de ciberseguridad desde su fabricación, elevando la resiliencia de todo el ecosistema.**

La madurez de estos pilares tecnológicos es una condición necesaria, pero no suficiente, para la transición. Es preciso analizar los obstáculos que frenan su implementación a gran escala.

Su visión para 2050 incluye:

- **Ciberseguridad por diseño:** La seguridad no será un añadido, sino una parte intrínseca del desarrollo de cualquier producto desde su fase inicial.
- **Resiliencia operativa:** Los vehículos autónomos deberán ser capaces de operar con total seguridad incluso en "**zonas de sombra**" o sin cobertura de red.
- **Marco Legal Consolidado:** Un entorno donde normativas como NIS2 y el Reglamento de Ciberresiliencia (CRA) hayan madurado para proteger toda la cadena de suministro.

## Autonomía

**Antidio Viguria Jiménez** (CATEC - Director de Sistemas)

Se enfoca en la **movilidad aérea innovadora** y la autonomía total de las aeronaves.

- **Aviación:** La aviación convencional continuará su modernización centrada en la **seguridad global**, abarcando tanto la seguridad operacional (*Safety*) como la protección frente a actos maliciosos (*Security*). La gestión del tráfico aéreo evolucionará para integrar de forma segura nuevos tipos de aeronaves en un espacio aéreo cada vez más congestionado.
- **Movilidad Aérea Innovadora:** Este segmento experimentará una disrupción significativa con la aparición de taxis aéreos para el transporte de personas y drones de gran capacidad para la logística. Se identifica un riesgo competitivo clave en la estrategia de despliegue: mientras Europa y EE. UU. apuestan por una fase inicial de varios años con piloto a bordo para generar confianza, **China ya ha certificado aeronaves sin piloto, arriesgándose a ganar una década de ventaja operativa y de mercado si su modelo demuestra ser seguro**
- **Autonomía "Sin Humano en el Bucle":** Para 2050, espera aeronaves capaces de tomar decisiones autónomas y gestionar fallos de forma automática, permitiendo que un solo supervisor gestione flotas de hasta 50 vehículos.
- **Densidad Energética:** El éxito depende de alcanzar tecnologías de baterías o hidrógeno con suficiente densidad para permitir grandes autonomías en vehículos sensibles al peso.
- **Gestión del Tráfico:** Un espacio aéreo eficiente basado en la comunicación **máquina a máquina (M2M)**.

**Maite Fernández Peña** (Fundación CIDAUT - Responsable de Innovación)

Presenta una visión cautelosa y realista sobre los plazos de la autonomía:

- **Escepticismo sobre la autonomía total:** No cree que para 2050 se haya alcanzado una autonomía total y conectada en todos los medios, aunque reconoce que la tendencia es imparable.
- **Coexistencia:** El gran reto será gestionar la convivencia de vehículos con diferentes niveles de autonomía y conductores humanos.
- **Seguridad y Energía:** Enfoque en el objetivo de **accidentes cero** mediante gemelos digitales y modelos predictivos, junto a una descarbonización total para dejar de depender de combustibles fósiles.

**Jorge Villagrà** (CSIC - Investigador en Automática y Robótica) se enfoca en el vehículo terrestre autónomo.

Su visión aborda el desafío urbano y el cambio de paradigma en la propiedad del vehículo:

- **Movilidad Autónoma a Demanda:** Un escenario urbano donde no sea necesario preocuparse por conducir o aparcar, transformando el espacio público (menos aparcamientos, más jardines).
- **Vehículo Definido por Software (SDV):** Plataformas físicas estables que se actualizan digitalmente como un móvil, evitando la obsolescencia mecánica rápida.
- **Mapas Dinámicos:** Superar la dependencia de mapas estáticos de alta definición para que el vehículo genere su propio conocimiento del entorno de forma dinámica.

## Comunicaciones

**Mar Hernández** (Vodafone Business - Ingeniería en Movilidad Conectada)

La comunicación en tiempo real es indispensable para la movilidad cooperativa y autónoma. Las redes **5G/6G**, en combinación con el **Multi-access Edge Computing (MEC)**, proporcionarán la **latencia ultra baja** (inferior a 50 milisegundos) requerida para casos de uso críticos, como la comunicación instantánea entre vehículos y usuarios vulnerables o la coordinación de flotas de vehículos autónomos. El principal desafío estratégico identificado no es tecnológico, sino de despliegue: la necesidad de garantizar una **cobertura 5G robusta y una densa red de nodos Edge** en todo el territorio europeo.

Su visión para 2050 es la de un continente **totalmente conectado**:

- **Cobertura 5G/6G Robusta:** El objetivo principal es garantizar una cobertura total en toda Europa y el despliegue masivo de nodos **Edge Computing** para asegurar latencias ultra bajas (10 ms).
- **Ecosistema Unificado:** Una plataforma donde usuarios vulnerables, drones, infraestructura y vehículos compartan datos en tiempo real para eliminar accidentes.
- **Modelos de Servicio:** El transporte se consolidará como **Mobility as a Service (MaaS)** y la infraestructura como **Platform as a Service (PaaS)**.

**Mónica Pelegrín Preixens (ADIF) y Eva Ramírez Rodríguez (INECO)**

Por parte de las infraestructuras, ambas expertas coinciden en una visión de **seguridad crítica certificada**:

- **Hibridación de Sensores:** Para asegurar la continuidad del servicio en entornos desafiantes (túneles, cañones urbanos), la tecnología GNSS se fusionará con un amplio abanico de sensores, incluyendo redes 5G, sistemas inerciales, cámaras y radares a

bordo del vehículo. Esta multisensorialidad será la clave para una localización ininterrumpida y fiable.

- **Estándares SIL4:** Garantizar los máximos niveles de seguridad ferroviaria mediante la calibración constante de señales satelitales con balizas físicas.

## RETOS Y OPORTUNIDADES

### Retos tecnológicos

**Navegación por satélite.** La navegación por satélite es vulnerable a interferencias intencionadas lo que exige desarrollar sistemas robustos que mitiguen ese riesgo. Por otra parte, en sistemas terrestres, estos sistemas de navegación tienen “zonas de sombra” en túneles o en desfiladeros, donde la señal satelital se pierde; en estos casos hay que complementar la información con infraestructura terrestre.

**Ciberseguridad.** El sector del transporte es un objetivo destacado para las amenazas militares o terroristas debido al impacto que una acción maliciosa puede tener en toda la sociedad. Como se ha comentado, el transporte es el segundo sector más atacado en la Unión Europea, principalmente mediante ransomware y filtración de datos. La implementación de la directiva europea NIS2 y la transposición del reglamento de Ciberresiliencia (CRA) supone un coste adicional y un reto de adaptación para los fabricantes y operadores, especialmente para las pequeñas empresas.

**Conectividad.** El despliegue masivo de nodos Edge Computing, necesario para conseguir las latencias entre 10 y 50 milisegundos) necesarias para la conducción autónoma crítica, es un gran reto a nivel europeo. Este despliegue es aún incipiente en muchas partes de Europa. En las zonas rurales hay brechas de cobertura que impiden que un vehículo autónomo dependa exclusivamente de la red móvil.

**Movilidad autónoma.** En el segmento eVTOL las actuaciones de las aeronaves están limitadas por la densidad energética de las baterías. Además, la certificación y el desarrollo de las infraestructuras urbanas que posibiliten sus operaciones son también barreras que hay que superar.

En el ámbito terrestre existe el desafío de poder dar respuesta a todas las situaciones incluyendo las más raras o imprevistas en entornos urbanos complejos (long tail challenges). En la actualidad hay casos en que los vehículos autónomos se quedan paralizados por no poder gestionar alguna situación especial en cruces. También hay que gestionar la aceptación social de los usuarios, actualmente no muy elevada debido al coste y la percepción de inseguridad tras fallos en proyectos piloto.

Además, la coexistencia de vehículos con distintos niveles de autonomía y conductores humanos es uno de los problemas más complejos de resolver antes de 2050.

**Infraestructuras.** El despliegue a gran escala de la movilidad conectada y autónoma exige una inversión enorme y coordinada en infraestructura digital (además de las redes 5G mencionadas, despliegue de sensores y mantenimiento de mapas de alta definición)

## Retos normativos

En el taller se ha subrayado que, en muchas ocasiones, las **barreras normativas y legales son incluso más determinantes que las tecnológicas** para alcanzar un transporte sostenible en 2050. Los expertos coinciden en que la regulación actual debe evolucionar para ofrecer seguridad jurídica sin frenar la innovación.

Los principales retos identificados en estas áreas son:

### 1. Marco Normativo de Ciberseguridad

- **Implementación de Directivas:** Uno de los retos inmediatos es la transposición de la **Directiva NIS2** en España, la cual finalizó su periodo de consultas en febrero de 2025. Esta norma impondrá obligaciones estrictas de supervisión y gestión de riesgos a los operadores de transporte, considerados sectores de alta criticidad.
- **Reglamento de Ciber resiliencia (CRA):** Este reglamento europeo, ya en vigor desde finales de 2024, establece requisitos obligatorios para fabricantes de productos con componentes digitales. El reto para las empresas es adaptarse a la "**seguridad desde el diseño**" y a la gestión obligatoria de vulnerabilidades durante todo el ciclo de vida del producto antes de su plena aplicación en 2027.
- **Responsabilidad y Sanciones:** Las nuevas leyes introducen **sanciones económicas severas** (hasta 15 millones de euros o el 2,1% del volumen de negocio) y responsabilidades directas para los órganos de dirección de las empresas en caso de incumplimiento.

### 2. Gobernanza y Soberanía Tecnológica

- **Soberanía Europea:** Existe una preocupación por garantizar la **autonomía estratégica de Europa** frente a monopolios tecnológicos de otras regiones. Esto implica no solo desarrollar tecnologías propias como Galileo, sino también establecer una **política espacial (Space Policy)** que regule el lanzamiento masivo de satélites para evitar conflictos y asegurar la seguridad en el espacio.
- **Fragmentación Regulatoria:** Jorge Villagrà destacó como un reto crítico la **falta de homogeneización** en las normas entre los diferentes países de la UE, lo que dificulta enormemente los trayectos transfronterizos de vehículos autónomos y la validación de soluciones tecnológicas a nivel continental.

### 3. Retos Legales de la Automatización

- **Responsabilidad Civil:** Determinar quién es responsable en caso de accidente de un vehículo autónomo (el fabricante, el desarrollador del software o el supervisor) sigue siendo un dilema legal fundamental que dificulta el despliegue comercial masivo.
- **Certificación de la IA:** Para 2050 se espera que las aeronaves y vehículos tomen decisiones autónomas sin intervención humana ("human out of the loop"). El reto

normativo es crear guías de **certificación para algoritmos de Inteligencia Artificial** que garanticen comportamientos predecibles y seguros en entornos no controlados.

- **Privacidad:** La hiperconectividad de los vehículos plantea desafíos legales sobre la **protección de datos personales** y la posible violación de la privacidad de los usuarios al ser monitorizados constantemente por la infraestructura.

#### 4. Estandarización y Certificación

- **Niveles de Seguridad (SIL4):** En sectores como el ferroviario, el reto es integrar nuevas tecnologías (como el satélite) manteniendo los estándares de seguridad más exigentes, lo que requiere un marco legal que permita la **hibridación de sensores** y la validación de señales.
- **Certificación Aérea:** En Europa, la normativa actual obliga a que los taxis aéreos sean pilotados al menos hasta 2030-2035, lo que resta competitividad frente a regiones como China, que ya permite vuelos sin piloto bajo otras regulaciones.

En conclusión, el enfoque de gobernanza para 2050 debe pasar de una regulación reactiva a una **proactiva y unificada**, que fomente la colaboración público-privada y permita realizar pruebas en entornos reales con mayor agilidad.

Para visualizar estos retos, podemos pensar en la tecnología como un **motor de gran potencia** y en la normativa como el **sistema de frenado y dirección**: sin leyes claras y equilibradas, el vehículo del progreso podría descarrilar o, por el contrario, nunca llegar a arrancar por exceso de precaución.

### Retos económicos y sociales

Los expertos del taller han identificado que la transición hacia el transporte de 2050 no es solo un desafío técnico, sino que conlleva profundas implicaciones **económicas y sociales** que determinarán la viabilidad del modelo.

#### Retos Económicos

- **Inversión y Sostenibilidad Financiera:** El desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en la movilidad aérea (eVTOL), requiere un **capital masivo**. Se ha mencionado anteriormente que empresas europeas de referencia como **Lilium o Volocopter** atraviesan crisis financieras graves, lo que pone en riesgo el liderazgo industrial de la región frente a USA o China (especialmente ésta, que ya ha certificado su aerotaxi eHang)
- **Costes de Fabricación y Obsolescencia:** La integración de sensores avanzados (LiDAR, cámaras, radares) sigue teniendo costes elevados. Además, existe el riesgo de **obsolescencia rápida** del hardware; por ello, la industria se está moviendo hacia el **"Vehículo Definido por Software"**, buscando que la plataforma física sea estable mientras las funciones se actualizan digitalmente para proteger la inversión.
- **Cambio de Modelo de Negocio:** Se prevé un giro desde la propiedad privada hacia modelos de **Movilidad como Servicio (MaaS)** y **Plataforma como Servicio (PaaS)**. Esto

busca reducir los costes operativos y mejorar la eficiencia logística (por ejemplo, barcos que ajustan su velocidad para llegar justo a tiempo para la descarga).

- **Soberanía y Competencia Global:** Europa se enfrenta al reto de no perder la **autonomía estratégica** frente a monopolios de EE. UU. y China, especialmente en áreas como la navegación por satélite y la electromovilidad.

### Retos Sociales

- **Aceptación del Usuario y Confianza:** Este es uno de los mayores obstáculos. El **miedo y la inseguridad** ante los vehículos autónomos han crecido debido a comportamientos erráticos o accidentes en fases de prueba. Menos del 10% de los usuarios en algunas zonas de EE. UU. se sienten seguros a bordo de estos vehículos.
- **Cambios en el Empleo:** La automatización total (especialmente en el sector marítimo y de transporte de mercancías) genera controversia por el **cambio de paradigma en los puestos de trabajo** y el temor a la pérdida de empleos tradicionales.
- **Inclusión y Envejecimiento:** Para 2050, **un tercio de la población tendrá más de 60 años**. La tecnología debe enfocarse en mejorar la **accesibilidad** para este grupo y para personas con movilidad reducida, garantizando que nadie quede excluido.
- **Urbanización vs. Zonas Despobladas:** Mientras que el 80% de la población vivirá en ciudades, lo que exige una gestión crítica de los **atascos** (que podrían superar las 100 horas anuales por habitante), también existe el reto de una **"Transición Justa"** para la España despoblada, donde el problema no es la descarbonización, sino la falta de servicio.
- **Privacidad y Ética:** La hiperconectividad plantea desafíos sobre la **protección de datos personales** y dilemas éticos sobre la toma de decisiones autónoma en caso de accidentes inevitables.

En resumen, el éxito del transporte en 2050 depende de equilibrar la rentabilidad industrial con un sistema que la sociedad entienda como seguro, ético y accesible para todos.

### Oportunidades

Frente a estas barreras, el desarrollo de las tecnologías que favorecerán el desarrollo del transporte conectado del futuro ofrece grandes oportunidades a entidades españolas.

España tiene una actividad relevante en los sistemas de navegación por satélite. El despliegue de constelaciones de órbita baja con satélites de posicionamiento, navegación y sincronización (LEO PNT) permitirá una navegación más económica y precisa que con los sistemas actuales. Además, el servicio de Alta Precisión (HAS) del sistema Galileo ofrece posicionados con una exactitud de centímetros sin depender de infraestructuras locales, facilitando la democratización del posicionamiento preciso. A largo plazo, se vislumbra el uso de tecnologías cuánticas para la encriptación y en los sensores de navegación avanzados.

La implantación de las normativas europeas obliga a adoptar la seguridad "desde el diseño", garantizando que los productos digitales sean intrínsecamente seguros desde su fase de

creación. Esto genera un ecosistema de confianza donde la gestión de vulnerabilidades es obligatoria durante todo el ciclo de vida del producto.

Las redes 5G permiten la comunicación V2X (vehicle-to-everything), mejorando la seguridad de usuarios vulnerables (ciclistas y peatones) mediante el intercambio de mensajes en tiempo real. La integración del transporte como un servicio (**Mobility as a Service - MaaS**) se apoya en esta conectividad para unificar el ecosistema de movilidad.

Para mitigar el problema de la obsolescencia del hardware en los vehículos autónomos, el concepto de **“Vehículo Definido por Software”** permitirá que la plataforma física del transporte sea estable, mientras que sus funcionalidades de seguridad se actualicen como un teléfono móvil. La movilidad autónoma a demanda podría transformar las ciudades, eliminando la necesidad de aparcamientos y reduciendo drásticamente los **accidentes por factor humano**.

En el ámbito de infraestructuras, la Integración de la infraestructura con la navegación por satélite y comunicaciones podría dar una posición relevante a España dada su fortaleza en infraestructuras, navegación por satélite y comunicaciones. Por otra parte, la multimodalidad del transporte permitirá aumentar la eficiencia logística y reducir las emisiones.

La tabla siguiente resume los retos y las oportunidades:

RETOS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Vulnerabilidad a interferencias en sistemas de navegación</li><li>• implementación directivas europeas de ciberseguridad</li><li>• Inversiones para el despliegue de redes para movilidad autónoma</li><li>• Certificación sistemas eVTOL</li><li>• Gestión casos raros en movilidad autónoma</li><li>• Soberanía tecnológica</li><li>• Fragmentación regulatoria en la UE</li><li>• Estandarización y certificaciones (SIL4 y Aeronáutica)</li><li>• Retos económicos (inversiones, costes de fabricación y obsolescencia)</li><li>• Retos sociales (aceptación de los usuarios, cambios en el empleo)</li></ul>
OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"><li>• Despliegue de constelaciones PNT LEO</li><li>• Implementación de la seguridad ciber desde el diseño</li><li>• Desarrollo de las redes 5G y Edge Computing y los sensores necesarios</li><li>• Desarrollo de vehículos definidos por software</li><li>• Integración de la infraestructura con la navegación por satélite y comunicaciones</li></ul>

## PROPUESTA DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS

El camino hacia el ecosistema de transporte de 2050 es una transformación de una complejidad sistémica. El análisis de los expertos deja claro que no estamos ante un desafío puramente tecnológico, sino ante un reto integral que involucra dimensiones regulatorias, económicas, sociales y de infraestructura. El éxito dependerá de una acción coordinada, proactiva y orientada a largo plazo, guiada por las siguientes líneas estratégicas:

1. **Fomentar un Enfoque Holístico y Multimodal** Es imperativo romper los silos que tradicionalmente han separado los distintos modos de transporte, así como los que existen entre sectores clave como la tecnología, la energía, el urbanismo y las telecomunicaciones. Solo una planificación integrada permitirá construir un sistema de movilidad verdaderamente eficiente y sostenible.
2. **Priorizar la Seguridad y la Confianza del Usuario** La seguridad, tanto en su vertiente física (*Safety*) como digital (*Security*), es la condición indispensable para la aceptación social de las nuevas tecnologías de movilidad. Es urgente desarrollar marcos de certificación y validación robustos y transparentes que garanticen al público que los sistemas autónomos y conectados son, como mínimo, tan seguros como las alternativas actuales.
3. **Desarrollar un Marco Regulatorio Ágil y Proactivo** La regulación no debe ir a remolque de la tecnología. Se necesita un cambio de paradigma hacia un marco normativo que evolucione en paralelo a la innovación, creando entornos controlados (*sandboxes*) para la experimentación segura y proporcionando la certidumbre jurídica que la industria necesita para invertir y desplegar soluciones a gran escala.
4. **Impulsar la Colaboración Público-Privada y la Soberanía Tecnológica** Las masivas inversiones en infraestructura digital y energética requeridas no pueden ser acometidas únicamente por el sector público ni por el privado. Son necesarias alianzas estratégicas para compartir riesgos y alinear objetivos. Al mismo tiempo, es crucial que Europa potencie sus tecnologías clave (como el sistema de navegación Galileo o el desarrollo del *Software Defined Vehicle*), **este último considerado por los expertos como "una de las últimas guerras en las que podemos ser competitivos" frente a los ecosistemas tecnológicos de EE. UU. y China.**

## CONCLUSIONES

Las conclusiones del "**Taller 2 – Tecnologías Habilitadoras**" reflejan un consenso entre expertos sobre la necesidad de integrar diversas herramientas digitales y marcos normativos para alcanzar un transporte descarbonizado y eficiente en **2050**. El evento, parte del proyecto "Prospectiva Transporte 2050", subraya que el éxito no depende de una única tecnología, sino de la **colaboración multidisciplinar** entre la academia, las empresas y la administración.

A continuación, se detallan las conclusiones principales del taller:

## 1. Navegación y Posicionamiento (GNSS)

- **Importancia de Galileo:** La navegación por satélite es considerada una tecnología **crítica y habilitadora** para todos los modos de transporte autónomo. El servicio **High Precision Service (HAS)** de Galileo ya permite una precisión centimétrica sin infraestructura terrestre local.
- **Resiliencia y Sincronización:** Es urgente desarrollar un sistema de navegación **robusto frente a interferencias** (anti-jamming/spoofing) y garantizar la **sincronización de tiempos** para infraestructuras críticas.
- **Hibridación de Sensores:** Para garantizar niveles máximos de seguridad (como el SIL4 ferroviario), el satélite debe combinarse con otros sistemas (inerciales, balizas, cámaras y LiDAR) para cubrir **zonas de sombra** como túneles o desfiladeros.

## 2. Ciberseguridad: Un Pilar Obligatorio

- **Alta Vulnerabilidad:** El transporte es el **segundo sector con más ciberataques** en la UE (11%), destacando el *ransomware* y la filtración de datos.
- **Seguridad desde el Diseño:** Las nuevas normativas europeas, como el **Reglamento de Ciberresiliencia (CRA)** y la directiva **NIS2**, imponen a fabricantes y operadores la gestión de vulnerabilidades durante todo el ciclo de vida del producto y sanciones severas por incumplimiento.

## 3. Conectividad y Latencia

- **Despliegue de 5G y Edge Computing:** Para la conducción autónoma crítica, se requiere una latencia ultra baja de **10 milisegundos**, lo que solo es posible con nodos de computación en el borde (*Edge*) que aún no están totalmente desplegados en Europa.
- **Brecha de Cobertura:** Existe una preocupación real por la falta de conectividad en **zonas rurales**, lo que limita la operatividad de los vehículos conectados fuera de los grandes corredores europeos.

## 4. Realidad de la Conducción Autónoma

- **Escepticismo sobre la Autonomía Total:** Se concluye que para 2050 **no se habrá alcanzado una autonomía total** en todos los niveles debido a la complejidad de la toma de decisiones en entornos urbanos y la convivencia con conductores humanos.
- **El Reto de la Inteligencia Artificial:** La IA enfrenta el problema del "**Long Tail**" (casos raros e imprevistos) que aún no sabe gestionar con seguridad total. Además, existe un fenómeno de "*autono-washing*" donde se vende una capacidad tecnológica superior a la realidad técnica actual.
- **Aceptación Social:** El **miedo y la inseguridad** del usuario están en aumento (menos del 10% de confianza en EE. UU.) debido a fallos visibles en proyectos piloto.

## 5. Estrategia Industrial y Regulatoria

PROSPECTIVA DEL TRANASPORTE 2050  
TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

- **Vehículo Definido por Software (SDV):** La tendencia es que el hardware sea estable pero las funciones de seguridad y servicio se **actualicen digitalmente** para evitar la obsolescencia rápida.
- **Soberanía Europea:** Es vital asegurar la **autonomía estratégica** frente a potencias como China (que ya tiene drones taxi certificados) y EE. UU., armonizando las normas transfronterizas dentro de la Unión Europea.

En conclusión, el taller identifica que el camino hacia 2050 requiere **más que innovación técnica:** exige un marco legal unificado, una infraestructura física y digital robusta y un esfuerzo por conseguir la confianza del ciudadano en estas tecnologías.