

FIGURA 1
EVOLUCIÓN DEL PARQUE DE AUTOMÓVILES EN ESPAÑA

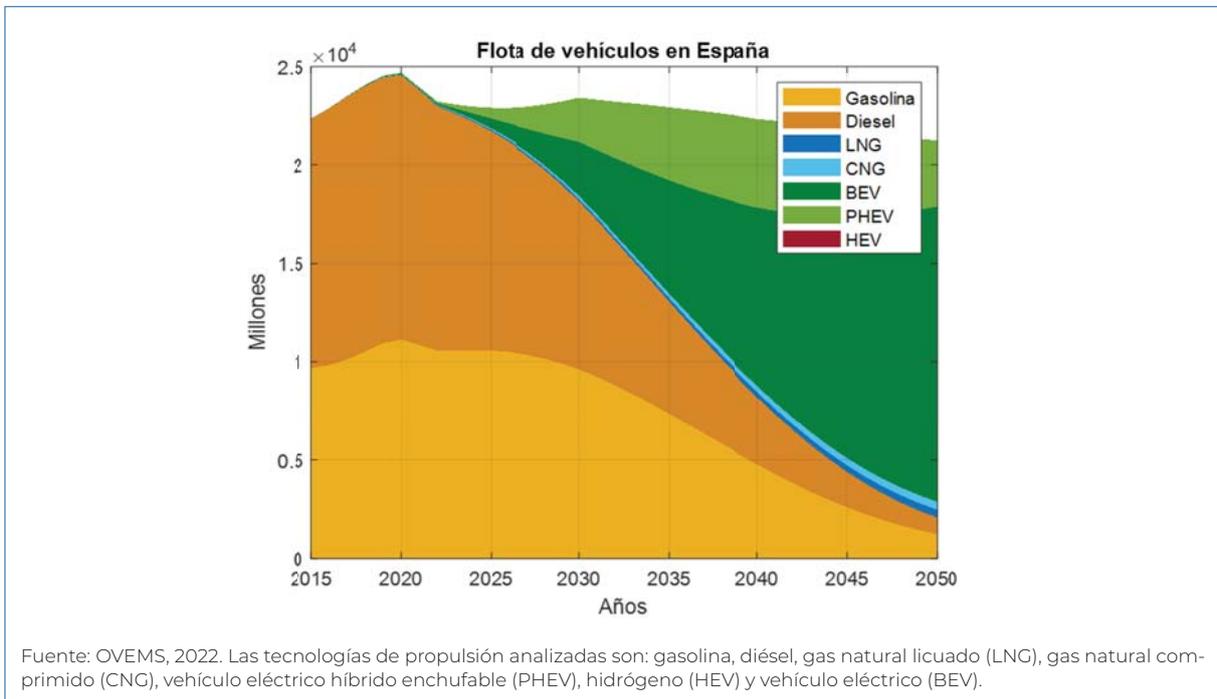
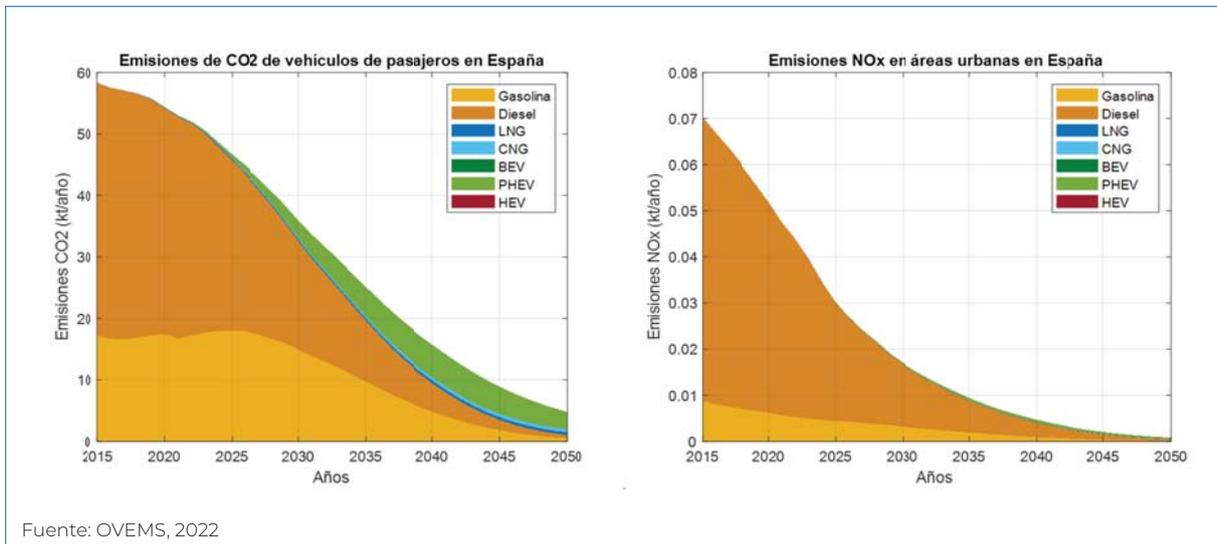


FIGURA 2
EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ POR MOVILIDAD URBANA E INTERURBANA Y DE NO_x EN TRAYECTOS URBANOS EN ESPAÑA

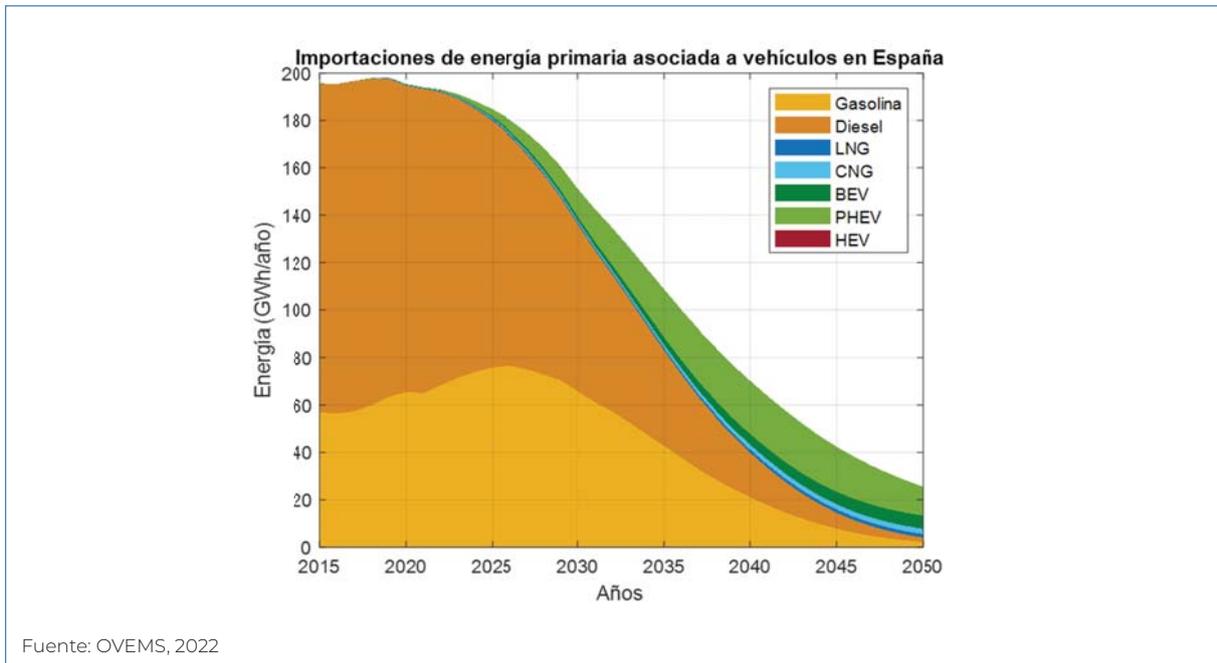


tas políticas dan lugar a una mejora de la calidad del aire en entornos urbanos, como se muestra en la gráfica con una importante reducción de las emisiones de NO_x.

Si la transición hacia una movilidad sostenible se acompaña con el desarrollo de fuentes renovables locales, se mejorará la

autonomía energética de la región reduciendo las importaciones de combustibles fósiles que serán sustituidos por biocombustibles y electricidad proveniente de generación local renovable. Esto supondrá una clara mejora de la balanza económica de la región, como se muestra en la figura 3 para España..

FIGURA 3
EVOLUCIÓN DE LA DEPENDENCIA ENERGÉTICA DEL POR TIPO DE VEHÍCULO
EN UN ESCENARIO DE ELECTRIFICACIÓN DEL PARQUE



EL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN DEL TRANSPORTE

El propio plan estratégico de la Comisión Europea (CE, 2021) indica que la digitalización y automatización son los elementos imprescindibles para esta transición, que permitirán mejorar el acceso y la conectividad, aumentando los niveles de seguridad, fiabilidad y confort, que también repercutirá positivamente en la mejora de la competitividad industrial. La Comisión Europea habla de dos transiciones que avanzan en paralelo, las transiciones hacia una economía verde y digital².

El proceso de digitalización ambiciona conocer en tiempo real tanto el estado de las infraestructuras, como la situación de los usuarios de las mismas: vehículos y personas. Conocer en detalle las infraestructuras de transporte, sean carreteras o ferrocarriles, es fundamental en las fases de operación y mantenimiento de éstas y en la planifica-

ción de futuros proyectos de expansión. A diferencia del sector eléctrico, las infraestructuras de transporte han tenido un menor grado de digitalización, situación que actualmente se está transformando gracias al uso cada vez más extendido de la metodología BIM (*Building Information Modeling*), que requiere de la digitalización de todos los elementos de una infraestructura en las fases de diseño, construcción y operación³.

Además, existe un conjunto de sensores desplegados en las carreteras que nos permite conocer en tiempo real el estado y uso de las mismas. Estos sensores se pueden clasificar en (Guerrero, 2018): sensores intrusivos (inductivos, neumáticos o magnéticos que miden el flujo de vehículos, su velocidad media y su categoría), y no-intrusivos (cámaras de video y radares instalados en pórticos o sensores inteligentes embebidos en la calzada que monitorizan y registran diferentes parámetros del estado de la carretera tales como la temperatura de la superficie o el es-

² En España, esta estrategia se ha concretado dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), con un programa de apoyo al transporte sostenible y digital, que consta de un conjunto de ayudas para la competitividad de empresas con proyectos concretos de transformación digital en el transporte. En su convocatoria de 2022 el monto de las ayudas ascendió a 460 millones de Euros.

³ En julio de 2023, El Consejo de ministros de España aprobó el Plan que ordena un uso gradual y progresivo de la metodología BIM por los órganos de contratación de la Administración General del Estado y el sector público estatal entre 2024 y 2030.

tado de la carretera seco / húmedo / hielo o nieve / sal residual / (lluvia helada).

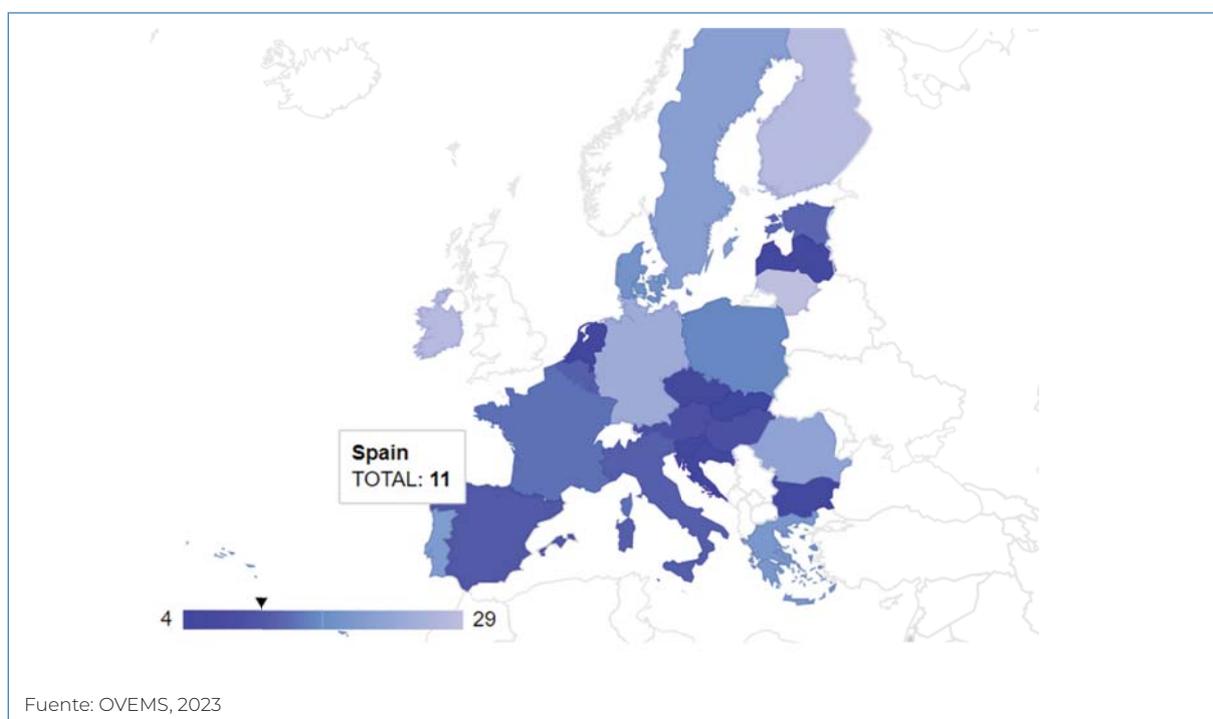
Un elemento fundamental para el desarrollo de la movilidad eléctrica es el despliegue de una red de puntos de recarga que permita la movilidad no sólo en entornos urbanos sino también en medias y largas distancias, con cargadores rápidos y ultrarápidos. Dado que la autonomía de los vehículos eléctricos actuales es de unos 400 km, y que el número de puntos de recarga públicos en muchos países (entre ellos España, véase la figura 4) todavía está en valores inferiores a los objetivos fijados⁴, es preciso que su nivel de disponibilidad sea lo más elevado posible. En este punto, la digitalización juega un papel fundamental al facilitar, entre otras cosas, la localización geográfica y la identificación de patrones de uso y, en definitiva, permitir la optimización de la disponibilidad de la red de cargadores⁵, que son los que habilitan para las

distintas funciones V2G. La Comisión Europea ha desarrollado y puesto a disposición de los usuarios un mapa europeo de las estaciones de recarga con información actualizada en tiempo real⁶.

La evolución de la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos en España se puede ver en la figura 5, donde se observa un menor despliegue en comparación con otros países europeos, y además sólo un 26% de los puntos de recarga son de recarga rápida.

Las tecnologías digitales se han introducido en los vehículos de forma muy rápida, debido al abaratamiento de los costes de los sistemas inteligentes y en un último término al desarrollo de la Inteligencia Artificial. Estas tecnologías se han centrado en la gestión autónoma de la conducción del vehículo, con una casi nula interacción con los sensores instalados en la infraestructura como los referidos en los párrafos anterior-

FIGURA 4
NÚMERO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS POR ESTACIÓN DE RECARGA EN EUROPA
EN EL AÑO 2023

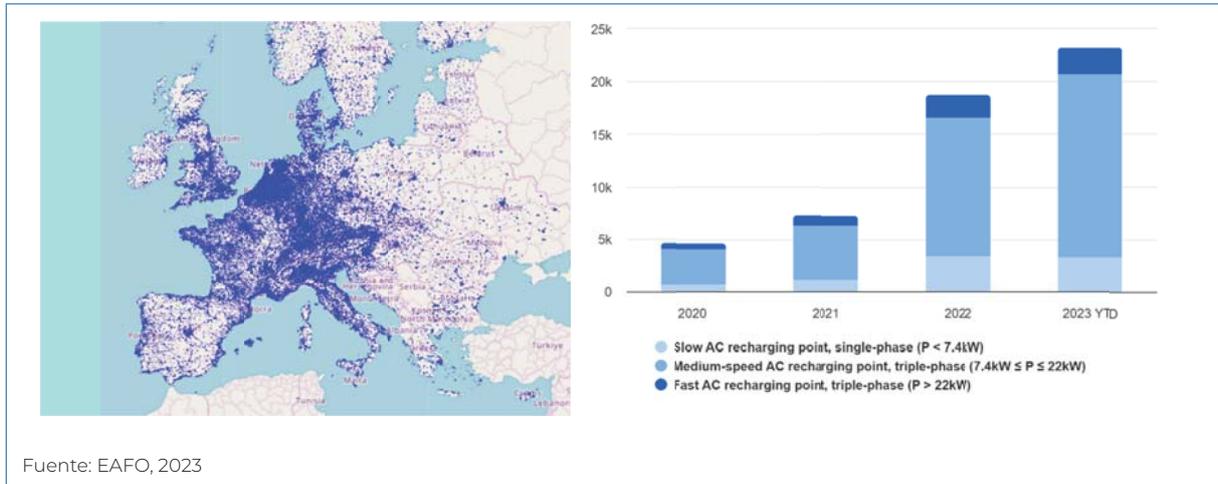


4 En España, en junio de 2021 se disponía de 20.243 estaciones de recarga, frente a los 45.000 puntos de recarga objetivo.

5 Según un informe publicado en noviembre de 2023, 1 de cada 4 puntos de recarga pública construidos en España no están operativos, principalmente por no tener finalizados los correspondientes trámites administrativos.

6 TENtix Interactive Map viewer en ec.europa.eu.

FIGURA 5
MAPA EUROPEO DE ESTACIONES DE RECARGA PÚBLICA (TENTEC, COMISIÓN EUROPEA, 2023⁷) Y EVOLUCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA EN ESPAÑA



res. Desde los primeros sensores de presión de neumáticos o aparcamiento, hasta la actualidad donde las cámaras, radar y el LIDAR (Light Detection And Ranging) permiten la conducción autónoma de los vehículos, ha habido un gran aumento del número de sensores distribuidos en el vehículo que ayudan a una conducción eficiente y segura. Esta inteligencia distribuida en los vehículos ha permitido suplir con creces la digitalización de las infraestructuras, sirviendo como elementos generadores de información en tiempo real que proporcionan un mejor conocimiento del uso de las carreteras.

Este desarrollo tecnológico hacia la digitalización ha ampliado el número de actores involucrados en la fabricación de vehículos con una mayor presencia de empresas tecnológicas centradas en la electrificación de la movilidad, su conectividad o la conducción autónoma.

La transición hacia una infraestructura inteligente y activa, que se comunique con los vehículos y usuarios, necesitará una redefinición de la infraestructura de comunicaciones para proveer los distintos servicios. Esta nueva definición de la red de comunicaciones debe partir de la caracterización de los distintos servicios de movilidad que se puedan prestar, basándose en las 5 V del BigData: **V**olumen (gran cantidad de información generada que hace imposible

almacenar y analizar una base de datos de forma tradicional), **V**elocidad (velocidad a la cual la información es generada, y es necesario que se comparta entre los distintos elementos), **V**ariación (distintos tipos de datos a usar, por ejemplo, consumo, grabaciones de las cámaras o medidas de la velocidad), **V**eracidad (calidad y precisión de la medida tomada) y **V**alor (capacidad para capitalizar los datos.).

Si aplicamos este análisis a la recarga de vehículos, cuando éstos están conectados a la red y tienen la posibilidad de consumir o devolver energía al sistema, el volumen de información será pequeño y corresponderá a las variables eléctricas asociadas a la recarga. La información es reducida y homogénea, ya que todos los datos son numéricos, pero la calidad y precisión de la información son muy importantes, no sólo por el valor económico del dato, incluido en un proceso de facturación por energía, sino por la criticidad del apoyo al sistema eléctrico en formato V2G, reduciendo la potencia consumida o inyectando potencia en la red eléctrica.

En el ejemplo anterior la conexión entre el coche y la infraestructura de recarga es una conexión física por cable. Sin embargo, para poder activar la conducción autónoma en nivel 5 (autonomía total del vehículo) es necesario contar con una importante red de comunicaciones y la llegada del 5G. Los vehículos actuales, según los sensores

con los que se equipen, pueden generar hasta 25GB de información cada hora (ver tabla 1), lo que requiere un gran ancho de banda de comunicaciones, del orden de 40GBits/s.

**TABLA 1
INFORMACIÓN GESTIONADA POR LOS
SENSORES DEL VEHÍCULO**

Tipo de sensor	Datos generados (Mbits/s)
Radar	0.1-15
LIDAR	20-100
Cámaras	500-3500
Ultrasónicos	<0.01
Movimiento del vehículo	<0.1

Fuente: Heinrich, 2017

La ingente cantidad de información generada por los vehículos y sus usuarios, así como la registrada por las infraestructuras físicas y de recarga, suponen una magnífica oportunidad para el uso de herramientas de inteligencia artificial que ayuden en varias escalas de tiempo: i) estudios de largo plazo (de varias décadas; como los activos, tanto móviles como de infraestructura, tienen una vida útil que va desde una década hasta los 100 años nos estamos refiriendo al análisis de políticas estables de descarbonización de los sistemas de transporte a largo plazo); ii) estudios de medio plazo (del orden de una semana, para establecer estrategias de movilidad de corto plazo como, por ejemplo, el establecimiento de restricciones de acceso a zonas de bajas emisiones), y iii) en tiempo real (conducción autónoma, pagos por peajes o recargas, información del estado de la circulación, etcétera).

Los beneficios derivados de una movilidad digital y conectada, contextualizados a nivel mundial, dentro de la iniciativa de Naciones Unidas Sum4all⁷ se pueden resumir en:

1. Movilidad eficiente, no sólo energéticamente los vehículos eléctricos son más eficientes que los de combustión, sino que también su digitalización permite la interacción de distintos medios

de transporte públicos y privados. Esto, ha permitido el desarrollo de plataformas, conocidas como “*Mobility as a Service*” (MaaS), que integran en una única aplicación los modos de transporte públicos y privados de una ciudad o región, de forma que el usuario pueda planificar, reservar y pagar su movilidad usando una única aplicación.

2. Movilidad accesible, cuya ausencia da lugar a la “pobreza en el transporte”, definida como la carencia de alternativas de movilidad asequibles económicamente y accesibles físicamente, tanto en la adquisición de un vehículo como el acceso al transporte público. La digitalización del transporte ayuda a identificar y localizar los retos de accesibilidad y proponer soluciones eficientes.

3. Movilidad segura, el aumento del número de sensores embarcados en el vehículo, y la conducción autónoma de nivel 5 deberían permitir reducir a corto plazo la accidentabilidad y mortalidad derivada del transporte⁸.

LA MOVILIDAD ELÉCTRICA Y CONECTADA

Además de los efectos mencionados la movilidad eléctrica y digital, al conectarse al sistema eléctrico en el proceso de recarga de baterías, puede proveer a éste de servicios adicionales. La interacción del vehículo con el sistema eléctrico se conoce como “carga inteligente”, y el servicio al sistema eléctrico se denomina “flexibilidad”, y consiste en controlar la potencia activa consumida por el vehículo o, incluso, revertir energía a la red eléctrica como lo haría un generador. Se pueden establecer 5 niveles de evolución en la prestación de este servicio de flexibilidad (Brief, 2019):

1. Sin control, donde no hay posibilidad de modificar el momento de la carga ni la energía que se consume.

⁷ www.sum4all.org

⁸ Naciones Unidas, a través del Banco Mundial ha impulsado para la década 2020-2023 la iniciativa *Data-Driven Innovation to Halve Road Fatalities and Injuries by 2030*.

2. Control básico, que permite la conexión/desconexión de toda la potencia de carga del vehículo.
3. Control de carga básico unidireccional (V1G), que regula la potencia consumida durante la carga del vehículo.
4. Control bidireccional de la carga (V2X), en la que el vehículo puede regular tanto la potencia consumida como la generada. Puede ser V2G ("*Vehicle to grid*") si el intercambio bidireccional de energía es con la red eléctrica directamente; V2H ("*Vehicle to home*") si se aprovecha para gestionar el consumo en la propia vivienda, y V2B ("*Vehicle to building*") si la flexibilidad se comparte dentro de un mismo edificio.

La flexibilidad en un sistema eléctrico es muy importante, en primer lugar, porque permite ajustar en tiempo real el necesario equilibrio entre generación y demanda eléctrica y, en segundo lugar, porque ayuda a garantizar los límites de operación de los distintos elementos que constituyen la red eléctrica (Pieltain, 2011). Esta flexibilidad tradicionalmente la han aportado los grupos de generación, y en los últimos años los mercados eléctricos están abriendo la posibilidad de que la demanda participe en este servicio. El parque de vehículos eléctricos, a diferencia de otros mecanismos tradicionales de flexibilidad, podría ser mucho más rápido y distribuido, lo que permitiría, no sólo apoyar la operación del sistema eléctrico en su conjunto, sino también a corregir puntualmente posibles limitaciones en las redes eléctricas locales.

Como ejemplo, si analizamos la conexión de 30.000 vehículos eléctricos en una ciudad costera de 170.000 habitantes, la carga de vehículos eléctricos podría suponer un sobre coste de más del 30% si no hay una estrategia de control coordinada de la recarga. Sin embargo, no serían necesarias inversiones si se gestionase la recarga en horas de bajo consumo en la red, como se muestra en la figura 6 (Frías, 2011).

La transición hacia una generación más sostenible liderada por la generación de origen renovable ha supuesto en las últimas décadas una mayor necesidad de

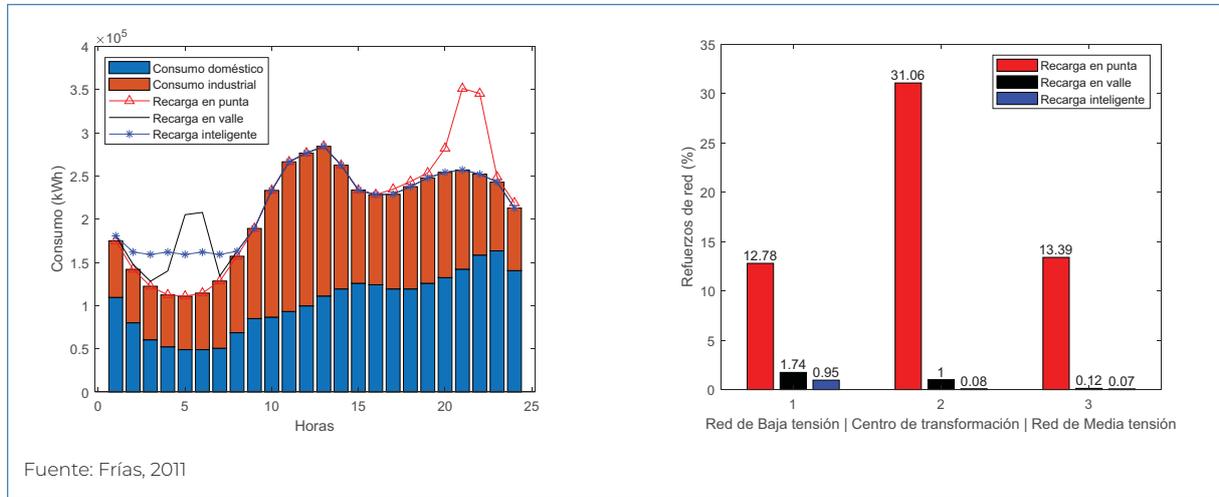
flexibilidad, dado que parte de esta generación renovable es gestionable y cuya fuente de energía puede tener problemas de predicción y variaciones rápidas, sobre todo a nivel local (ej. efecto de las nubes o las rachas de viento). Por ello, la movilidad eléctrica conectada puede aportar su flexibilidad para corregir estos posibles desvíos, y así mejorar la integración de generación renovable en los sistemas y redes eléctricas (Izadkhast, 2016) (Fernandes, 2012).

REGULACIÓN PARA EL ACCESO A UNA MOVILIDAD ELÉCTRICA CONECTADA

En los apartados anteriores hemos identificado que la movilidad eléctrica conectada tiene un doble impacto en la descarbonización de la energía. Por un lado, como sustitución de modos de transporte (privado o público) que usan combustibles fósiles, y por otro, por su apoyo a la integración de generación renovable en los sistemas eléctricos. No obstante, la regulación para garantizar esta transición está todavía en desarrollo. A continuación, se recogen algunas reflexiones sobre las mejoras necesarias:

- **Estabilidad y coherencia regulatoria.** La transición hacia una movilidad sostenible requiere tiempo, y precisa de políticas estables que garanticen las inversiones que deben realizar los usuarios en la compra de un vehículo para uso privado y el despliegue de la red de carga. La estabilidad debe ser coherente con las políticas y directrices fijadas por la Unión Europea, cuyas normas tienen que ser transpuestas y permear las regulaciones de los distintos estados miembros, en sus políticas regionales y locales. Además, hay que promover la alineación de intereses dentro del mismo nivel administrativo que garantice la coordinación entre los distintos departamentos / consejerías / ministerios implicados (movilidad, medioambiente, transformación digital, hacienda, industria, sanidad, entre otros).

FIGURA 6
IMPACTO DE LA FLEXIBILIDAD EN LA CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LAS INVERSIONES DE REDES DE DISTRIBUCIÓN



- La digitalización de la movilidad habilitará **una mayor interacción entre vehículos e infraestructuras**, y permitirá activar las plataformas de *Mobility as a Service*. Para poder crear servicios y modelos de negocio alrededor de la digitalización hay que construir ecosistemas flexibles basados en la colaboración público-privada⁹. Además, la gestión coordinada de espacios físicos es un elemento muy relevante en entornos urbanos, para crear *hubs* de movilidad eléctrica compartida en los que participan agentes públicos y privados dedicados a diferentes modalidades desde la micro-movilidad hasta la logística¹⁰.
- Es necesario un correcto diseño de **políticas fiscales** para el adecuado fomento de la inversión y uso de movilidad eléctrica y conectada. A este respecto, se deben promover tarifas/incentivos dinámicos y por uso, ya que la digitalización de las infraestructuras permitirá adecuar las mismas a las necesidades de movilidad (ej. cargos por congestión en función del nivel de uso de las vías o infraestructura).
- Diseño de tarifas eléctricas para que el vehículo eléctrico pueda proveer flexibilidad y servicios específicos al**

sistema y red eléctrica. Estas tarifas deberían basarse en la medición inteligente a lo largo del día para dar señales eficientes que permitan aprovechar los excedentes de generación eléctrica y mejorar la explotación conjunta de los sistemas eléctrico y de transporte.

- La movilidad conectada viene asociada a la **generación de gran cantidad de información** de los usuarios, vehículos e infraestructuras. Para capitalizar todos los servicios relacionados con la movilidad conectada es preciso que los datos se puedan compartir entre todos los agentes. Es esencial garantizar la confidencialidad y buen uso de esta ingente información y para ello, en primer lugar, hay que estandarizar los formatos y protocolos de comunicación entre los distintos agentes.

CONCLUSIONES

La transformación digital del transporte ha avanzado rápidamente gracias a la digitalización y conectividad de los vehículos, que compensa la lenta sensorización de las infraestructuras, lo que permite avanzar hacia

⁹ La iniciativa Madrid Green Urban Mobility Lab en la ciudad de Madrid, y promovida por su Ayuntamiento, promueve proyectos innovadores de movilidad sostenible, mguml.com.

¹⁰ El Hub Canalejas en Madrid, tiene una potencia instalada de 2.5 MW que comparte distintos servicios de movilidad eléctrica, como logística, empresas de coches, bicicletas y micro movilidad compartidas, así como su servicio de parking público.

los objetivos de una movilidad sostenible de bajas emisiones, eficiente, segura y accesible en la integración de distintas formas de movilidad, principalmente el transporte público.

Dentro de la movilidad de bajas emisiones, la movilidad eléctrica facilitará una rápida reducción de las emisiones derivadas del transporte, tanto a nivel global de CO₂ como local de NO_x y partículas en los entornos urbanos. Además, la movilidad eléctrica puede aportar al sistema eléctrico una flexibilidad muy distribuida en toda la red eléctrica. Esta flexibilidad, asociada a la conexión al punto de recarga, puede modificar el consumo eléctrico y también devolver energía a la red. Esta capacidad de gestión tiene un doble impacto, por un lado, puede evitar sobrecargas en la red eléctrica local, permitiendo un ahorro en refuerzos de dicha red; en segundo lugar, permitirá adaptar el consumo a la generación de energía eléctrica poco gestionable, en su mayoría proveniente de fuentes renovables. Para que esta flexibilidad pueda usarse es necesario una adecuada conectividad de las flotas de vehículos eléctricos.

Por tanto, la movilidad eléctrica, conectada y digital, es un elemento clave para la descarbonización no sólo del sector transporte sino un apoyo a la descarbonización del sector de la generación de energía eléctrica.

REFERENCIAS

Arghandeh R. y Zhou Y., "Big Data Application in Power Systems", Elsevier.

SOBRE LOS AUTORES

Pablo Frías es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica e investigador en el Instituto de Investigación Tecnológica, en E.T.S.I. ICAI de la Universidad Pontificia Comillas. Ha participado en más de 70 proyectos de investigación y cuenta con más de un centenar de publicaciones científicas y varias patentes. En el ámbito de la movilidad sostenible director del Observatorio del Vehículo Eléctrico y la Movilidad Sostenible, Coordinador del grupo de trabajo de Industria de Vehículos Cero Emisiones en Madrid Green Urban Mobility Lab y Miembro del Consejo Académico de AEDIVE. Áreas de interés: operación y planificación de sistemas eléctricos, movilidad sostenible, máquinas eléctricas.

Andrés D. Díaz Casado es ingeniero electromecánico de ICAI (Universidad Pontificia Comillas, 1981). Desde 1982 hasta 2018 ha trabajado en Endesa en las áreas de Planificación Energética, Regulación y Gestión de Energía. Desde el año 2009 es imparte docencia en sistemas de energía eléctrica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, y es colaborador del Observatorio del Vehículo Eléctrico y Movilidad Sostenible. Áreas de interés: Estudio, planificación y regulación de sistemas energéticos.

BRIEF, IRENA Innovation Landscape. *Electric-Vehicle Smart Charging*. 2019

European Commission, COM (2020) 789. *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future, 2020*.

EAF0, *European Alternative Fuels Observatory, 2023*, eaf0.eu

Fernandes, C., Frías, P., Latorre, J.M. *Impact of vehicle-to-grid on power system operation costs: the Spanish case study*. Applied Energy. Vol. 96, pp. 194 - 202, August 2012.

Frías, P., Mateo, C., Pérez-Arriaga, I.J. *Evaluación del impacto de la integración del coche eléctrico en las redes de distribución de energía eléctrica*. Lychnos. Cuadernos de la Fundación General CSIC. N° 6, pp. 56 - 61, September 2011.

Gobierno de España, "Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia", 2021

Guerrero-Ibáñez, J.; Zeadally, S.; Contreras-Castillo, J. *Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems*. Sensors 2018, 18, 1212.

Heinrich, S. MOTORS, Lucid. *Flash memory in the emerging age of autonomy*. Flash Memory Summit, 2017, p. 1-10.

Izadkhash, S., García-González, P., Frías, P., Ramírez-Elizondo, L., Bauer, P. *An aggregate model of plug-in electric vehicles including distribution network characteristics for primary frequency control*. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 31, n° 4, pp. 2987 - 2998, July 2016.

Koska T. et al. *The Path to Sustainable Mobility Systems – 8 Theses on a digital mobility transition*, Huawei, Wuppertal Institut, 2021.

OVEMS, *Observatorio de la Movilidad Eléctrica y Sostenible, 2023*. Evobservatory.iit.comillas.edu

Pieltain, L., Gómez, T., Cossent, R., Mateo, C., Frías, P. *Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks*. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 26, n° 1, pp. 206 - 213, February 2011.

Sooyeob K., *Sustainable Transport and Digitalization*, ESCAP, 2019.

Timmers VRJH, Achten PAJ, *Non-exhaust PM emissions from electric vehicles*, Atmospheric Environment, 2016 – Elsevier, vol. 134.