

MODELO DINÁMICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO PARA LA MOVILIDAD EN ESPAÑA

índice

01/ RESUMEN EJECUTIVO	04
02/ INTRODUCCIÓN: REDES DE SUMINISTRO DE ENERGÍA (ESTADO DEL ARTE)	06
03/ DESCRIPCIÓN DEL MODELO	08
04/ DATOS DE ENTRADA	11
05/ DEFINICIÓN DE ANÁLISIS	17
06/ RESULTADOS	18
07 / CONCLUSIONES	24
08 / PREGUNTAS FRECUENTES	25
09 / GLOSARIO Y BIBLIOGRAFÍA	26

El trabajo recogido en este informe se encuadra en la Línea de Actuación 7 del programa de Aragón en el área de interés “Energía e Hidrógeno renovable” de los Planes Complementarios previstos en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Dicho programa está financiado en un 64.2% por la Unión Europea – NextGenerationEU (PRTR-C17I1), con una tasa de financiación del 100%; siendo el restante 35.8% co-financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional dentro del Programa Aragón PRAR FEDER 21-27, con una tasa de financiación del 40%.

01/ RESUMEN EJECUTIVO



Este informe presenta el desarrollo y la validación de un modelo diseñado para evaluar la adopción de vehículos de hidrógeno (FCEV) en el marco de la transición hacia un **transporte alternativo**. En un contexto en el que las tecnologías basadas en combustibles fósiles derivados del petróleo siguen siendo dominantes, se exploran alternativas como el **hidrógeno**, la **electricidad**, los **biocombustibles**, el **GLP** y el **G NV**. El modelo empleado es **neutral** en relación con tecnologías específicas y permite **simular distintos escenarios**, evaluando el impacto de factores como las **políticas regulatorias**, los **incentivos económicos** y la evolución de la **infraestructura necesaria**.

La herramienta se basa en una simulación multiagente que emula la interacción de dos tipos de agentes: los **usuarios de vehículos** y las **estaciones de servicio**.

Se incorporan **variables clave** —como el precio de la energía, los costos de los vehículos, la autonomía, los tiempos de repostaje y la disponibilidad de infraestructura—, lo que permite analizar cómo la adopción de FCEV se ve influida por estos elementos en competencia con otras tecnologías. Mediante esta **simulación** se modelan decisiones de adopción de forma **dinámica**, adaptándose a cambios en el entorno, como nuevas políticas fiscales o incentivos económicos.

Además, el modelo introduce un **enfoque flexible** al asignar **distintos pesos** a las variables según la percepción de los usuarios, lo que posibilita la exploración de **diversos escenarios** de transición tecnológica.

De esta manera, se evalúa cómo las condiciones y decisiones políticas inciden en la adopción de vehículos de hidrógeno y en la **infraestructura asociada**, sin favorecer ninguna tecnología en particular.

Para la validación se consideran 2 análisis principales:

Futuro sin combustibles fósiles derivados del petróleo: Se estudia el impacto de la legislación europea en la adopción de FCEV y otras energías, así como en el desarrollo de la infraestructura, en distintos horizontes temporales (2035, 2040, 2045 y 2050).

Impulso económico mediante incentivos: Se evalúa cómo los incentivos financieros, como los descuentos en el precio de los FCEV, afectan la adopción de esta tecnología y las preferencias de los usuarios a lo largo del tiempo.



Los resultados de las simulaciones indican que, bajo un escenario de **prohibición temprana de vehículos con emisiones** (2035), la adopción de vehículos de hidrógeno podría ser considerablemente mayor para 2050.

Asimismo, los **incentivos económicos** planteados desempeñan un papel no tan importante en acelerar esta transición, con un impacto que depende del nivel de descuento. El análisis también subraya la necesidad de contar con una **red de repostaje** adecuada para soportar el crecimiento en la adopción de vehículos de hidrógeno.

En resumen, el informe **valida la utilidad del modelo** al ofrecer una herramienta flexible y dinámica, capaz de **simular diversos escenarios** de transición hacia el hidrógeno u otras tecnologías.

Al ser el modelo adaptable mediante la modificación de los datos de entrada, sus resultados varían según los escenarios y condiciones consideradas, proporcionando **información estratégica** clave para la toma de decisiones en políticas regulatorias y la **optimización de la infraestructura de repostaje**.

02 / INTRODUCCIÓN: REDES DE SUMINISTRO DE ENERGÍA (ESTADO DEL ARTE)



El sistema de suministro de energía se encuentra en una **fase crítica** de transición hacia **fuentes alternativas**, impulsada principalmente por **requerimientos legislativos** orientados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las tecnologías emergentes, el **hidrógeno** se perfila como una solución alternativa debido a su capacidad para proporcionar **energía limpia**; sin embargo, también existen otras opciones como la **electricidad**, los **biocombustibles** y los **vehículos a gas**.

2.1. Contexto y relevancia

Para fomentar la adopción del hidrógeno y de otras alternativas, es crucial establecer una red de suministro de energía **diversa, adaptable y escalable**, que pueda satisfacer tanto las necesidades inmediatas de abastecimiento como la **creciente demanda** de vehículos con sistemas de propulsión alternativos.

Actualmente, la infraestructura de repostaje para hidrógeno es especialmente **limitada** en muchas regiones, lo que dificulta su adopción masiva y perpetúa la **dependencia de combustibles fósiles** en **sectores clave**.

Además, los **retos logísticos y económicos** – como los altos costos iniciales de inversión y la incertidumbre regulatoria– deben abordarse para hacer estas tecnologías más accesibles y competitivas.

2.2. Impacto de las políticas de restricción e incentivos

Las **políticas regulatorias**, tales como las restricciones en el uso de combustibles fósiles y los incentivos para tecnologías limpias, son **factores clave** que afectan la transición energética en el sector del transporte. Estudios previos han demostrado que **combinar** restricciones a los combustibles fósiles con incentivos para energías alternativas es una **estrategia efectiva** para reducir la huella de carbono y promover tecnologías sostenibles. La implementación temprana de restricciones ha acelerado la adopción tanto de vehículos eléctricos como de hidrógeno, aunque ello requiere contar con una **infraestructura de apoyo sólida** que garantice un **acceso eficiente a las estaciones de repostaje**.

Por otro lado, los **incentivos económicos** – como descuentos en la compra de vehículos y subsidios para la adaptación de estaciones a energías alternativas– facilitan la transición al hacer estas tecnologías más **competitivas** frente a los vehículos basados en combustibles fósiles.

Dichos incentivos no solo fomentan la adquisición de vehículos alternativos, sino que también **estimulan la inversión** en infraestructura de repostaje, ampliando la red de estaciones para hidrógeno, electricidad y biocombustibles, y reduciendo así la **dependencia de los combustibles fósiles**.

Diversos países han implementado políticas de incentivos con resultados prometedores para la adopción de tecnologías de trans-

porte alternativas. Por ejemplo, **Portugal** ofrece **subvenciones directas y exenciones fiscales** para vehículos eléctricos, lo que ha facilitado su acceso y promovido un notable crecimiento en la cuota de mercado.

Noruega, pionera en el uso de incentivos, ha establecido exenciones fiscales y beneficios de acceso para vehículos eléctricos, logrando que más del **80 % de los vehículos nuevos vendidos sean eléctricos**.

Asimismo, **Francia y Alemania** han puesto en marcha bonificaciones y subsidios significativos para la adquisición de **vehículos de bajas emisiones** y de **hidrógeno**, contribuyendo al desarrollo de infraestructura de carga y al aumento de la adopción de vehículos eléctricos y de pila de combustible de hidrógeno en Europa.

Este informe explora cómo estas políticas de restricción e incentivos afectan la adopción de tecnologías alternativas en el sector del transporte en **España** y cómo pueden facilitar el desarrollo de una red de suministro de energía capaz de soportar una **transición efectiva**.

Al evaluar diferentes escenarios de prohibiciones e incentivos, se busca comprender mejor el rol de estas políticas en la transformación energética, proporcionando **información valiosa** para optimizar estrategias futuras en la transición hacia una **movilidad más sostenible**.

03/ DESCRIPCIÓN DEL MODELO



El modelo de adopción de tecnologías vehiculares ha sido diseñado para **caracterizar la evolución** de la infraestructura de repostaje de hidrógeno, **simulando la transición** desde combustibles fósiles hacia el hidrógeno.

El modelo de adopción de tecnologías vehiculares ha sido diseñado para caracterizar la evolución de la infraestructura de repostaje de hidrógeno, simulando la transición desde combustibles fósiles hacia el hidrógeno.

Aunque el enfoque principal es el hidrógeno, el modelo también incorpora otras tecnologías competidoras —como los combustibles fósiles (derivados del petróleo, por ejemplo, gasolina o diésel), la electricidad, los biocombustibles y los vehículos a gas— que sirven de referencia o actúan como alternativas en el proceso de adopción.

Mediante un enfoque multiagente, el modelo representa tanto a los conductores como a las estaciones de servicio, integrando variables clave que influyen en la elección tecnológica de los agentes, tales como:

- **Precios de energía.**
- **Precio y disponibilidad de vehículos.**
- **Disponibilidad de infraestructura.**
- **Autonomía y tiempos de repostaje.**

El objetivo principal es observar cómo las decisiones individuales de los agentes, influenciadas por incentivos, restricciones y regulaciones, generan **patrones agregados**

de adopción tecnológica y modifican la infraestructura de repostaje de hidrógeno en función de la demanda y la evolución del mercado.

El modelo está diseñado para capturar las interacciones entre tres componentes principales:

1. **Agentes conductores:** Representan a los usuarios finales que deciden qué tecnología adoptar en función de sus preferencias y restricciones.
2. **Estaciones de servicio:** Infraestructura de repostaje que evoluciona en respuesta a la demanda y las políticas regulatorias.
3. **Escenarios regulatorios y de mercado:** Condiciones externas como prohibiciones de combustibles fósiles o incentivos.

Este enfoque permite analizar las **complejas interacciones** entre tecnologías emergentes, patrones de movilidad y la evolución de la infraestructura, generando **insights clave** para apoyar decisiones estratégicas en la transición hacia el hidrógeno.

3.1 Comportamiento de vehículos

El agente “vehículo” representa a los usuarios que, de manera periódica, evalúan si mantener su tecnología actual o cambiar a una alternativa. Esta decisión se basa en los factores mencionados anteriormente, centrándose exclusivamente en variables medibles y dejando de lado aspectos cualitativos —como la concienciación medioambiental— que son más difíciles de cuantificar. Esta aproximación garantiza un análisis fundamentado en elementos concretos y observables.

Con el objetivo de poder realizar comparaciones y establecer conclusiones válidas, se dan por ciertas las siguientes características del agente vehículo:

- **Distribución inicial:** Los porcentajes iniciales de agentes para cada tipo de energía se basan en el parque vehicular actual, utilizando datos de fuentes como la DGT y ANFAC.
- **Patrones de movilidad:** Los agentes siguen rutas definidas a partir de una matriz origen-destino que incorpora las principales vías de España, basándose en indicadores como el IMD (Índice de Movilidad) derivados de datos del MITMA.
- **Estrategia de repostaje:** La mayoría de los agentes realizan el repostaje antes de iniciar su trayecto; sin embargo, un porcentaje significativo lo efectúa durante el recorrido. En rutas largas, si la autonomía de su tecnología resulta insuficiente, se realizan repostajes adicionales según la necesidad.
- **Vida útil y renovación:** Cada vehículo posee una vida útil determinada por su

tecnología. Al finalizar este ciclo, aumenta la probabilidad de que el vehículo sea reemplazado.

- **Proceso de decisión:** Al cambiar de vehículo, los agentes evalúan las distintas tecnologías mediante una función de utilidad o compra que asigna probabilidades a cada opción, considerando las variables mencionadas.
- **Adopción de tecnología dominante:** Si una tecnología resulta “dominante” (es decir, presenta ventajas claras en la función de utilidad), la probabilidad de que sea elegida aumenta, acelerando su adopción.
- **Segmentación de los agentes:** Los agentes se clasifican según dos criterios:
 - Tipo de vehículo: pesado o ligero, basándose en datos reales de movilidad (por ejemplo, los valores de IMD para cada).
 - Nivel económico: alto o bajo, definible según el porcentaje de la población perteneciente a la clase alta, de acuerdo con criterios establecidos por la OCDE.
- **Hipótesis adicionales:**
 - Cada agente posee un único vehículo.
 - Se asume que ni la demanda ni las ventas de vehículos nuevos aumenta.
 - No se tienen en cuenta los posibles cambios en la movilidad, como por ejemplo el impacto de los vehículos autónomos o nuevas fórmulas de movilidad compartida.

3.2 Comportamiento de estaciones

El agente “estación” representa los puntos de repostaje y recarga distribuidos tanto en áreas urbanas como en rutas interurbanas. Estas estaciones evolucionan en función de la **demanda de energías alternativas**, partiendo de una oferta inicial basada en combustibles fósiles y, progresivamente, adoptando nuevas tecnologías como el hidrógeno a medida que aumenta su uso en las zonas circundantes.

Características del agente estación:

- **Distribución inicial:** Las estaciones se ubican inicialmente en los principales municipios de España y a lo largo de las rutas interurbanas de mayor tránsito. Al inicio del modelo, todas las estaciones ofrecen combustibles fósiles; en cambio, el hidrógeno solo se encuentra disponible en estaciones situadas en municipios de gran población.

- **Necesidad de puntos de repostaje:** La expansión de la red de estaciones está directamente vinculada al número de vehículos que utilicen cada tecnología. Inicialmente, se adopta una proporción similar a la observada en el mercado del GLP a fecha 31/12/2023, es decir, un punto de repostaje por cada 100 vehículos. Conforme aumenta la adopción de tecnologías alternativas, esta proporción se reducirá progresivamente hasta aproximarse a la densidad actual de puntos de

repostaje para combustibles fósiles. Este ajuste responde a la optimización de la red, a la madurez tecnológica y a la estabilización de la demanda.

- **Adopción temprana de nuevas tecnologías:** Las primeras estaciones en adoptar una nueva tecnología serán las ubicadas en rutas con mayor concentración de vehículos de esa tecnología que la utilicen y un alto volumen de clientes en general.

3.3. Lógica de compra

Cuando un agente vehículo decide cambiar de tecnología, utiliza una función de utilidad para evaluar cada opción disponible y seleccionar aquella que obtenga la mayor puntuación. Esta función considera variables clave, tales como:

- **Precio de la energía.**
- **Precio del vehículo.**
- **Disponibilidad de estaciones.**
- **Disponibilidad de vehículos.**
- **Autonomía.**
- **Tiempos de repostaje.**

Su fórmula se puede ver en la siguiente figura:

$$U_i = w_1 \cdot f_1(P_i) + w_2 \cdot f_2(PV_i) + w_3 \cdot f_3(Des_i) + w_4 \cdot f_4(Dveh_i) + w_5 \cdot f_5(T_i) + w_6 \cdot f_6(A_i)$$

- w_i → Peso de la variable i en la utilidad total.
- P_i → Precio de la energía i en relación al precio fósil.
- PV_i → Precio del vehículo que utiliza la tecnología i .
- Des_i → Disponibilidad de estaciones de servicio para la energía i .
- $Dveh_i$ → Disponibilidad de vehículos para la energía i .
- T_i → Tiempo de repostaje por cada 100 km para la energía i .
- A_i → Autonomía (km) de los vehículos con energía i .

- **Disponibilidad de estaciones y vehículos:** se calcula en función de las estaciones disponibles para cada tecnología en el modelo y del porcentaje de vehículos que usan esa tecnología. Este enfoque sigue el concepto de “learning by doing”, donde el aumento en el número de vehículos reduce el costo y aumenta la disponibilidad.

- **Resto variables:** se basan en datos reales y en supuestos, como se describirá en la sección de Datos de Entrada.

Para garantizar que la tecnología seleccionada sea viable, se impone una restricción basada en la infraestructura de repostaje:

- **Viabilidad mínima:** La tecnología solo es considerada viable si existe un mínimo de estaciones disponibles en la ruta del agente.
- **Requisitos según la ruta:** Dependiendo de la distancia de la ruta y de la autonomía del vehículo, se requieren al menos 2 estaciones en trayectos moderados o 3 en trayectos más largos. En rutas cortas, una única estación puede ser suficiente, lo que facilita la adopción en estos casos.

Esta limitación inicial está diseñada para reflejar patrones realistas de adopción en las primeras fases del modelo, garantizando que la infraestructura soporte adecuadamente las rutas principales antes de expandirse hacia rutas menos frecuentes o áreas remotas.

A medida que la adopción de tecnologías alternativas crece y la infraestructura se expande, estas restricciones se vuelven menos críticas, permitiendo una transición progresiva y natural hacia otras opciones tecnológicas.

3.4 Ponderación

La función de utilidad asigna distintas ponderaciones a cada variable, reflejando las prioridades de los usuarios. Estos pesos han sido determinados basándose en la opinión de expertos en la materia. La asignación varía según la tipología del agente, diferenciándose en función del tipo de vehículo (ligero o pesado) y del nivel de ingresos (bajo o alto). A continuación, se presenta la distribución de la ponderación para cada grupo:

Descripción Tipo Agente	Precio Energía	Precio Vehículo	Disponibilidad Estaciones	Disponibilidad Vehículos	Autonomía	Tiempo de Repostaje
Ligero, Bajo Ingreso	20	60	10	5	5	0
Ligero, Alto Ingreso	10	40	15	15	5	15
Ligero, Bajo Ingreso	20	40	15	15	5	5
Ligero, Alto Ingreso	30	20	15	15	10	10

Tabla 1. Resumen ponderación fórmula de utilidad

Esta tabla muestra la ponderación asignada a cada variable en la función de utilidad de los agentes, diferenciando entre cuatro tipos de agentes según su tipología y nivel de ingresos:

- **Ligero, Bajo Ingreso:** Da alta prioridad al precio del vehículo (60%) y moderada al precio de la energía (20%).
- **Ligero, Alto Ingreso:** Prioriza menos el precio del vehículo (40%) y distribuye importancia en el tiempo de repostaje (15%) y la disponibilidad de estaciones (15%).
- **Pesado, Bajo Ingreso:** Similar al tipo ligero de alto ingreso, pero con una menor importancia en el tiempo de repostaje (5%).

- **Pesado, Alto Ingreso:** Otorga mayor importancia al precio de la energía (30%) y a la autonomía (10%), con una ponderación equilibrada en otras variables.

04/ Datos de entrada

Los datos de entrada son fundamentales para garantizar la precisión y relevancia del modelo de adopción de tecnologías alternativas en el sector transporte.

Estos datos representan las variables clave que afectan las decisiones de los agentes y permiten simular de manera realista cómo influyen aspectos como las políticas de incentivo y restricción, los precios de los vehículos y de las energías, la disponibilidad de infraestructura, la autonomía y los tiempos de repostaje en la transición hacia tecnologías como el hidrógeno.

Enfoque Flexible y Adaptable

Es importante destacar que, si bien contamos con datos actuales provenientes de fuentes confiables, los datos a futuro se basan en interpretaciones fundamentadas en estudios, tendencias y análisis de expertos (por ejemplo, de la IEA, IRENA y otras publicaciones de

la industria). Esto significa que:

- **Los datos a futuro no se presentan como predicciones exactas, sino como supuestos ajustables.** Nuestra herramienta permite explorar diferentes escenarios, modificando los supuestos conforme se disponga de nueva información o cambien las condiciones del mercado.
- **La flexibilidad del modelo es una fortaleza clave,** ya que permite a los usuarios realizar análisis de sensibilidad y visualizar cómo variaciones en parámetros (como precios, incentivos o infraestructura) afectan la adopción de tecnologías. Este enfoque convierte la incertidumbre inherente al futuro en una oportunidad para evaluar distintos “qué pasaría si...”, facilitando la toma de decisiones estratégicas.

Las principales categorías de datos de entrada incluyen:

- **Precios de la energía:** Se expresa el coste en €/100 km para cada tecnología, considerando valores actuales y supuestos interpretativos para el futuro.
- **Precios de los vehículos:** Coste inicial de adquisición de vehículos comparables entre las distintas tecnologías.
- **Autonomía de los Vehículos:** Distancia máxima que puede recorrer un vehículo con una carga completa o depósito lleno.
- **Tiempos de Repostaje/Carga:** Tiempo requerido para reabastecer o recargar el vehículo, aspecto crucial especialmente para tecnologías como la eléctrica.

Para garantizar una comparación homogénea entre tecnologías, todos los datos se relativizan respecto a la tecnología fósil (tomada como punto de referencia), expresándose cada valor en términos relativos (porcentaje o factor).

De este modo, lo que realmente incide en el modelo es la diferencia proporcional entre tecnologías, facilitando el análisis directo del

impacto de cada variable en las decisiones de compra y la evolución tecnológica.

Supuestos adicionales:

- **Recarga en vehículos eléctricos:** se asume que los vehículos eléctricos se recargan siempre en cargadores ultrarrápidos, tanto en términos de tiempos como de precios.
- **Factores económicos:** elementos como la inflación y otros factores macroeconómicos no se consideran en este análisis, puesto que el objetivo es evaluar el impacto relativo de las tecnologías en función de los supuestos definidos.
- **Para los datos actuales se han empleado fuentes confiables y representativas del mercado,** mientras que los datos a futuro son basadas en la literatura y estudios recientes. Esta aproximación flexible no solo permite capturar el estado actual del mercado, sino que también ofrece a los decisores la capacidad de adaptar el modelo a nuevos escenarios, convirtiéndolo en una herramienta estratégica para la planificación y evaluación de la transición hacia tecnologías limpias.

4.1.Precios de la energía

Los precios de las distintas fuentes de energía (combustibles fósiles, electricidad, hidrógeno, entre otros) son una variable clave en el modelo, ya que afectan directamente la competitividad económica de cada tecnología de transporte.

Para facilitar la comparación, todos los precios se han expresado en **€/100 km**, permitiendo una evaluación uniforme y centrada en los costos operativos para el usuario final. Este enfoque permite evaluar de manera realista los costes para el usuario final.

Este valor se introduce en el modelo, donde se escala y compara con el precio de referencia de los combustibles fósiles derivados del petróleo, facilitando el análisis de su impacto.

Para simplificar la verificación de los datos, se incluyen a continuación información de los precios de manera más clara.

Precios Actuales y Fuentes

Para los precios actuales de cada tipo de energía, se han utilizado fuentes confiables y representativas del mercado:

- **Combustibles Fósiles (Gasolina y Diesel):**
 - Rango: **9-11 €/100 km**.
 - Basado en precios actuales reportados por el Gobierno de España.
 - **Fuente:** Gobierno de España, euros por 100 km.
- **Electricidad (para Vehículos Eléctricos - Carga Ultrarrápida):**
 - Rango: **9-12 €/100 km**.
 - Calculado para tarifas de carga ultrarrápida (0.40-0.60 €/kWh) con un consumo promedio de 15-20 kWh/100 km.
 - **Fuente:** IEA, Global EV Outlook 2023.

- **Hidrógeno Verde:**
 - Rango: **12-15 €/100 km**.
 - Basado en precios actuales de producción por electrólisis.
 - **Fuente:** IRENA, Global Hydrogen Review 2023.
- **Gas Natural Comprimido (GNC):**
 - Rango: **6-8 €/100 km**.
 - Calculado en función de un consumo de 6-8 kg/100 km y un precio promedio de 1 €/kg.
 - **Fuente:** IEA, Natural Gas Market Review.
- **Biocombustibles (Biodiesel, Bioetanol):**
 - Rango: **9-11 €/100 km**.
 - Los precios reflejan los costos adicionales de producción y distribución.
 - **Fuente:** IEA, Renewables 2023.

Proyecciones de Precios y Supuestos

Los precios de la energía se proyectan a futuro basándonos en suposiciones sobre tendencias de mercado y políticas energéticas internacionales actuales.

Estas proyecciones no deben tomarse como predicciones exactas, sino como estimaciones que se utilizan para modelar diferentes escenarios en el análisis.

A continuación, se describen las proyecciones para cada tipo de energía hasta 2050, teniendo en cuenta los datos disponibles y los supuestos adoptados en el modelo.

Combustibles Fósiles:

- Según las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la demanda de petróleo alcanzará su punto máximo antes de 2030 debido a la transición energética hacia tecnologías más limpias. Esto podría llevar a una disminución del precio del barril de Brent en el mercado global.
- Sin embargo, el precio del petróleo representa solo una fracción (aproximadamente el 35%) del precio final de los combustibles fósiles en el surtidor.
- En España, los impuestos representan alrededor del 50% del precio final de la gasolina y el diésel. Esto incluye el Impuesto

Especial de Hidrocarburos (IEH) y el IVA, que se calcula sobre el precio base más el IEH.

- Incluso si el precio del barril baja, el peso de los impuestos en el precio final seguirá siendo determinante.
- La Unión Europea está revisando la Directiva sobre Fiscalidad de la Energía para alinear la fiscalidad de los combustibles fósiles con los objetivos climáticos. Esto incluye:
 - Eliminar exenciones fiscales obsoletas para los combustibles fósiles.
 - Incrementar impuestos ambientales, como el carbon tax, para reflejar el impacto ambiental y sanitario de su uso.
- Estos cambios fiscales tienen como objetivo desincentivar el uso de combustibles fósiles y fomentar la transición hacia tecnologías más limpias.
- Aunque el precio del barril pueda disminuir, el posible aumento de impuestos podría traducirse en un aumento del precio final al consumidor en el surtidor. Esto se alinea con las políticas europeas que buscan reducir la competitividad de los combustibles fósiles frente a alternativas limpias, como la electricidad y el hidrógeno.
- **Fuente:** Adaptado de IEA, World Energy Outlook 2023.

Electricidad (Carga Lenta):

- Se espera que los precios de la electricidad para carga de vehículos eléctricos disminuyan hacia 2050, gracias a la expansión de la generación de energías renovables y al desarrollo de una infraestructura de carga más competitiva. Esto incluye la integración de fuentes renovables, como la solar y eólica, que han demostrado ser cada vez más rentables.
- **Fuente:** IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2022.

Electricidad (Carga Ultrarrápida):

Aunque se espera que el costo de la carga ultrarrápida también disminuya, su reducción será más limitada en comparación con la carga lenta, debido al mayor costo de la infraestructura.

Hidrógeno Verde:

- El precio del hidrógeno verde se proyecta a la baja gracias a avances tecnológicos en **electrólisis** y la reducción de los costos de electricidad renovable. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), los costos de producción podrían acercarse a **1,5 USD/kg para 2030** en regiones con excelentes recursos renovables.
- Esto representa una disminución significativa en comparación con los precios actuales, que oscilan entre **3 y 8 USD/kg**. Aunque no se detalla una proyección exacta para 2050, la tendencia hacia una mayor **competitividad** del hidrógeno verde frente a los combustibles fósiles está clara, impulsada por:
 - Reducción del costo de generación renovable:** Energías como la solar y la eólica siguen disminuyendo sus costos de producción, favoreciendo la electrólisis.
 - Escalabilidad de la producción:** La expansión de proyectos de hidrógeno de bajas emisiones podría alcanzar un volumen de 38 millones de toneladas para 2030, un incremento del 50% frente a proyecciones anteriores.
- Fuente:** Adaptado de IEA, Global Hydrogen Review 2023.

Gas Natural Comprimido (GNC):

- Aunque el GNC es una opción económica en el presente, se espera un **aumento moderado en sus precios** a largo plazo debido a la implementación de impuestos ambientales y a la creciente presión para reducir el uso de combustibles fósiles.
- Se proyecta que los precios alcancen un rango de **7 a 9 €/100 km para 2050**. Además, la variabilidad en su precio puede ser algo determinante en la imagen para el cliente final, como por ejemplo sucedió con la subida por la guerra de Ucrania en 2022.

Biocombustibles:

- Los biocombustibles, incluyendo el bio-metano, podrían experimentar una reducción en sus costes de producción debido a avances en la tecnología de producción y en el uso de biomasa. Se estima que para 2050 el rango de precios esté entre **7 y 9 €/100 km**.

En base a lo anterior se obtiene la tabla 2:

Tecnología	Precio actual (2024)	Precio en 2030	Precio en 2040	Precio en 2050
Fósiles (Gasolina/Diésel)	9-11 €/100 km	10-12 €/100 km	12-14 €/100 km	14-16 €/100 km
Eléctricos (ultrarrápida)	9-12 €/100 km	7-9 €/100 km	5-7 €/100 km	4-6 €/100 km
GLP	7-9 €/100 km	8-10 €/100 km	10-12 €/100 km	11-13 €/100 km
GNV	6-8 €/100 km	6-8 €/100 km	7-9 €/100 km	7-9 €/100 km
Hidrógeno	12-15 €/100 km	7-9 €/100 km	5-7 €/100 km	4-6 €/100 km

Tabla 2. Evolución precios energía (€/100km)

4.2. Precios vehículos

Los precios de los vehículos representan una variable crucial en el modelo, ya que afectan directamente las decisiones de adopción de tecnologías limpias por parte de los agentes.

Para realizar una comparación realista entre las distintas tecnologías disponibles, se han seleccionado modelos específicos de vehículos con características y prestaciones similares en cada categoría: vehículos de hidrógeno (H2), eléctricos de batería (BEV) y de combustión interna (ICE).

Esta selección permite observar cómo las diferencias de precio inicial afectan la elección de los agentes en escenarios con y sin incentivos.

Precios Actuales y Modelos de Referencia

Para representar los precios actuales de los vehículos, se han elegido modelos representativos de cada tecnología. Estos modelos fueron seleccionados en consulta con expertos en la materia, quienes identificaron opciones con prestaciones comparables en términos de tamaño, autonomía y rendimiento:

- Hidrógeno (H2):**
 - Toyota Mirai: 74,200 €
- Combustión Interna (ICE):**
 - Audi A5: 52,233 €
 - BMW Serie 3: 47,130 €
 - Skoda Superb: 40,519 €
- Vehículos Eléctricos de Batería (BEV):**
 - BYD Seal: 39,085 €
 - Polestar 2: 57,100 €
 - Tesla Model S: 93,970 €

Tras esto y haciendo una media aritmética los resultados serían en torno a:

- H2:** 74.000€
- ICE:** 46.000€
- BEV:** 63.000€

Con lo que tendríamos que, de media, un vehículo eléctrico puro (BEV) tiene un sobrecoste del 37% sobre los turismos de combustión (ICE) y un vehículo de hidrógeno (H2) tiene un sobrecoste del 60% con respecto a los vehículos de combustión (ICE).

Las otras tecnologías se asumen precios similares a los vehículos de combustión (ICE).

Proyecciones de Precios y Supuestos

Para las proyecciones se asume que tanto las tecnologías eléctricas como de hidrógeno convergerán con el fósil para el año 2050::

Tecnología	Precio actual (€)	Precio 2030 (€)	Precio 2040 (€)	Precio 2050 (€)
Fósil	46.000	46.000	46.000	46.000
Eléctrico	63.000	57.000	49.000	46.000
Hidrógeno	74.000	64.500	51.000	46.000
Renovable	46.000	46.000	46.000	46.000
GNV	46.000	46.000	46.000	46.000
GLP	46.000	46.000	46.000	46.000

Tabla 3. Proyección de precios por tecnologías para vehículos ligeros

Tecnología	Precio actual (€)	Precio 2030 (€)	Precio 2040 (€)	Precio 2050 (€)
Fósil	22.000	22.000	22.000	22.000
Eléctrico	41.500	38.000	32.000	27.000
Hidrógeno	35.000	33.000	29.200	25.000
Renovable	22.000	22.000	22.000	22.000
GNV	22.000	22.000	22.000	22.000
GLP	22.000	22.000	22.000	22.000

Tabla 4. Proyección de precios por tecnologías para vehículos pesados

Para los pesados de hidrógeno se asumen porcentajes iguales de diferencia que en los ligeros debido a la no existencia de una

cabeza tractora comercial de hidrógeno. En cuanto al eléctrico se toman precios de ofertas reales.

4.3. Autonomía

La tercera variable sería la autonomía de los vehículos, expresada en km, la diferencia más significativa se encuentra en los vehículos eléctricos siendo las demás tecnologías muy similares.

Tecnología	Autonomía (Kms)
Fósil	750
Eléctrico	350
Hidrógeno	650
Renovable	750
GNV	750
GLP	700

Tabla 5. Autonomías por tipo de energía

4.4. Tiempos de repostaje

Otra variable serían los tiempos de repostaje de los vehículos, expresada en segundos/100 km, la diferencia más significativa se encuentra en los vehículos eléctricos siendo las demás tecnologías muy similares al igual que en la autonomía.

Tecnología	Tiempo repostaje por 100 Kms (s)
Fósil	30
Eléctrico	450
Hidrógeno	40
Renovable	30
GNV	40
GLP	40

Tabla 6. Tiempos de repostaje por cada 100km

05/ Definición de análisis



Se han diseñado dos análisis principales para validar el modelo y evaluar el impacto de diferentes políticas en la adopción de tecnologías alternativas, poniendo especial énfasis en el despliegue de infraestructura de hidrógeno.

Estos escenarios se han seleccionado porque representan dos palancas fundamentales que pueden influir en la transición hacia tecnologías limpias: la legislación y los incentivos económicos.

En este contexto:

- La **legislación** actúa como un impulsor regulatorio que, a través de medidas restrictivas (como la prohibición de vehículos de combustión interna), puede forzar una transición hacia alternativas de energía limpia.

- Los **incentivos económicos** pueden acelerar esta transición mediante subsidios, descuentos o apoyos financieros, reduciendo el costo de adopción de tecnologías emergentes como el hidrógeno.

Aunque el hidrógeno es el foco central del análisis, también se contempla la interacción con otras tecnologías (electricidad, biocombustibles y gas natural vehicular) para ofrecer una visión integral de la transformación del sector transporte.

A continuación, se detallan las características y objetivos de cada escenario:

5.1. Futuro sin combustibles fósiles derivados del petróleo

Este análisis evalúa los efectos de una prohibición gradual de los vehículos de emisiones directas, implementada en distintas fechas: 2035, 2040, 2045 y 2050.

El objetivo principal es determinar cómo el momento de aplicación de esta política influye en la velocidad y magnitud de la adopción del vehículo de hidrógeno y de su infraestructura.

La variable clave en este análisis es el año en que se implementa la ley que prohíbe la elección de vehículos de emisiones directas de CO2 al momento de renovar el vehículo.

Este enfoque permite analizar el impacto de diferentes tiempos de implementación en:

- El ritmo de adopción de las diferentes tecnologías poniendo el énfasis sobre el hidrógeno.

• El despliegue de infraestructura de soporte para el hidrógeno.

Los resultados ayudan a evidenciar que la legislación tiene un alto grado de influencia

5.2. Impulso económico

Este escenario explora cómo los incentivos económicos pueden acelerar la adopción de tecnologías limpias mediante descuentos en el precio de adquisición de vehículos sostenibles en comparación con los de combustibles fósiles. Para este análisis, se ha definido varios niveles de incentivo: descuento del 20% y 40% sobre el precio de los vehículos fósiles para vehículos de hidrógeno.

El propósito principal es evaluar cómo diferentes grados de incentivos afectan las preferencias de los agentes, fomentando la transición hacia tecnologías como el hidró-

geno. Al reducir el coste de adquisición de los vehículos de hidrógeno, se busca identificar las condiciones necesarias para que los agentes perciban estas tecnologías como opciones más accesibles desde el punto de vista económico.

Este enfoque destaca la importancia de diseñar políticas económicas estratégicas para promover la transición hacia un transporte alternativo, al mismo tiempo que se asegura que la infraestructura de soporte evolucione acorde con la creciente adopción de esta tecnología.

06/ Resultados

6.1 Metodología empleada

Para alcanzar los resultados planteados, se ha seguido un proceso estructurado que incluye las siguientes etapas:

1. Preparación y carga de datos de entrada

- Se identificaron y recopilamos los datos necesarios para los escenarios definidos.
- Los datos fueron preprocesados para garantizar su calidad y consistencia antes de ser cargados en el modelo de simulación.

2. Simulación de escenarios

- Se definieron múltiples escenarios con base en las variables de interés y las hipótesis establecidas.
- Cada escenario fue simulado empleando el modelo, con un tiempo promedio de ejecución de **10 minutos por escenario**.
- Las simulaciones generaron datos detallados de salida, representando las dinámicas y resultados del sistema bajo las condiciones de cada escenario.

3. Exportación y preparación de resultados

- Los datos generados por las simulaciones se exportaron en formato **CSV** para facilitar su análisis posterior.
- Los archivos CSV fueron importados en **Power BI**, donde se prepararon las estructuras de datos necesarias para los análisis visuales y estadísticos.

4. Análisis y Visualización de Resultados

- En Power BI, se diseñaron desbordes interactivos que permitieron la exploración visual y comparativa de los resultados.
- Los análisis incluyeron la evaluación de métricas clave, identificación de patrones, y comparación de resultados entre escenarios.
- Se documentaron hallazgos relevantes y se elaboraron gráficos y visualizaciones para su inclusión.

6.2. Resultados de futuro sin combustibles fósiles derivados del petróleo

AÑO ENTRADA LEY	2040	2045	2050
E1.2035	5%	16%	22%
E2.2040	3%	12%	20%
E3.2045	2%	9%	16%
E4.2050	2%	8%	14%

Tabla 7. Resumen evolución vehículo hidrógeno (parque circulante)

En primer lugar, se muestra en modo tabla los resultados para vehículos de hidrógeno para ver cómo influye sobre ellos el cambio de la aplicación de la ley (ver tabla 7).

Los resultados evidencian una tendencia clara: a mayor retraso en la aplicación de la ley que restringe los vehículos basados en tecnologías fósiles derivadas del petróleo, mayor es la dificultad para que tecnologías alternativas, como el hidrógeno, se consoliden en el mercado.

En los escenarios en que la implementación de la ley se difiere a fechas posteriores (2045 y 2050), se observa una penetración significativamente menor de vehículos de hidrógeno.

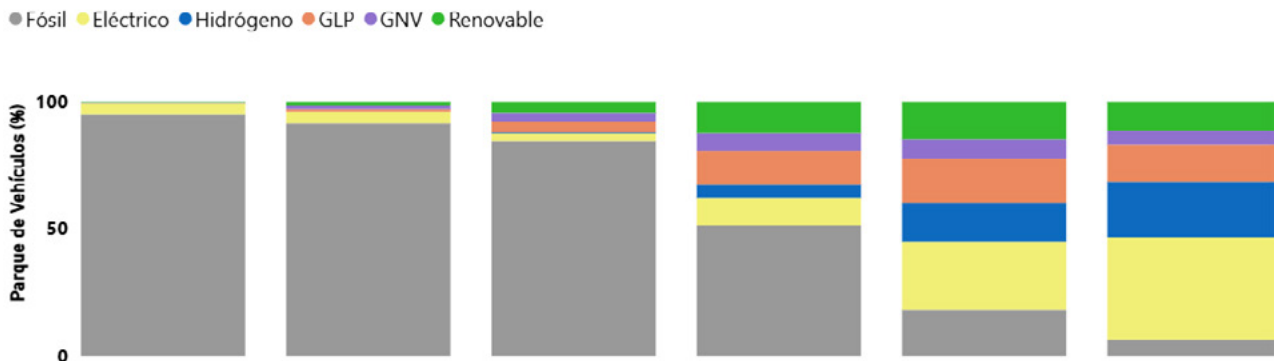
Esto se debe a que la continua disponibilidad de vehículos fósiles derivados del petróleo prolonga la transición, ofreciendo a los consumidores una opción que permanece viable por más tiempo.

En el escenario con aplicación de la ley en 2035, el hidrógeno comienza a ganar terreno de manera temprana, alcanzando un 5% de participación en 2040 y escalando hasta un 22% del parque vehicular en 2050 (casi una cuarta parte).

En contraste, cuando la ley se retrasa hasta 2050, el hidrógeno apenas comienza a ganar relevancia en 2043, llegando a un 8% en 2045 y un 14% en 2050.

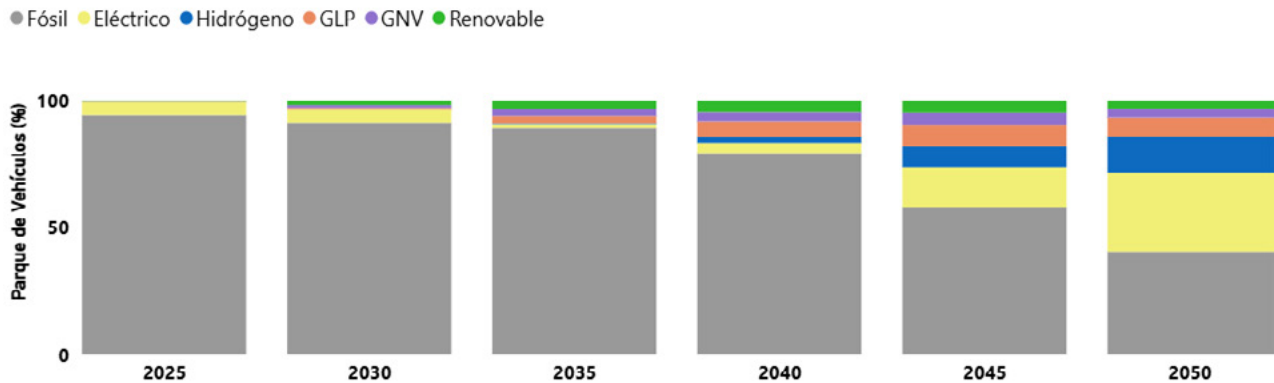
Las siguientes gráficas ilustran la evolución temporal de la participación de las distintas tecnologías energéticas en el parque vehicular para los escenarios de aplicación de la ley en 2035 y en 2050. Cada visualización destaca el impacto que tiene el momento de implementación sobre la adopción de tecnologías alternativas, proporcionando una perspectiva clara sobre el ritmo y la magnitud de la transición tecnológica bajo diferentes políticas regulatorias.

Evolución del parque de vehículos por tecnología (2025–2050)



Gráfica 1. Evolución tecnologías del parque de vehículos escenario 1 (E1.2035).

Evolución del parque de vehículos por tecnología (2025–2050)



Gráfica 2. Evolución tecnologías del parque de vehículos escenario 4 (E4.2050).

En el escenario E1.2035, se observa que para 2050 se configura un mix energético en el parque vehicular en el que todas las tecnologías tienen su relevancia.

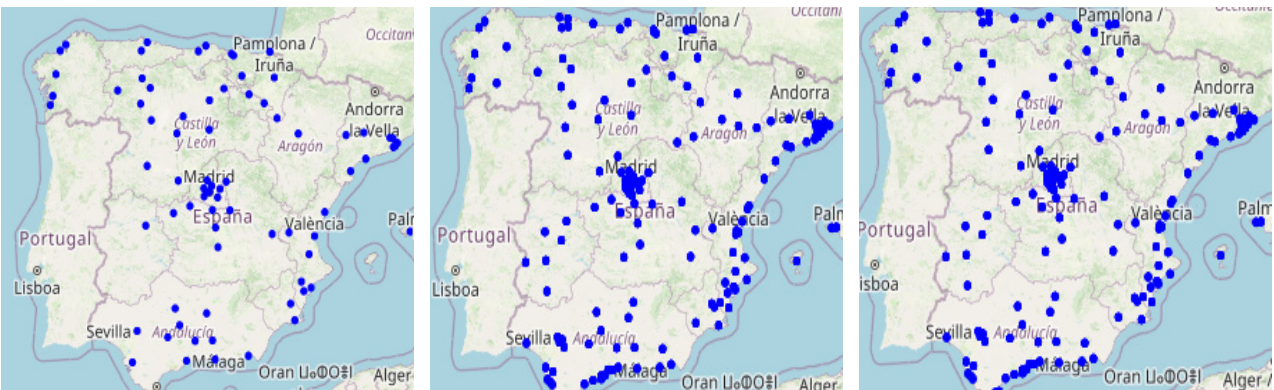
No obstante, el GNV resulta ser la opción menos significativa, mientras que los vehículos eléctricos alcanzan la mayor participación, lo que indica que el mercado se reparte entre las distintas alternativas sin que ninguna predomine de forma absoluta.

En contraste, en el escenario E4.2050 el despliegue de las tecnologías se retrasa. En este caso, los vehículos eléctricos logran ganar mayor fuerza, seguidos de cerca por el hidrógeno, mientras que los combustibles gaseosos y los biocombustibles quedan rezagados.

Además, para tener la visión completa en los siguientes mapas se puede ver la distribución completa. Los gráficos circulares muestran las estaciones activas de hidrógeno.

En la gráfica veríamos el escenario 1, para el caso de aplicación de la ley en 2035 y la situación que se daría en 2030, 2040 y 2050. En la gráfica 4, veríamos la misma evolución, pero para el caso de retrasar la ley hasta 2050.

Se aprecia como la infraestructura se retrasa de la misma manera que se retrasa la adopción de los coches de hidrógeno. Rutas como Madrid – Valencia, o el corredor mediterráneo entre otras son las primeras en activarse.



Gráfica 3. Distribución de estaciones de hidrógeno en años 2030, 2040 y 2050



Gráfica 4. Distribución de estaciones de hidrógeno en años 2030, 2040 y 2050 en Esc.4 P2050

6.3. Resultados de impulso económico

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de los dos escenarios propuestos, en los que se evalúa el impacto de incentivar la transición hacia vehículos de hidrógeno mediante la intervención de la administración. Los escenarios analizados son:

- **Escenario 1:** Incentivo medio al vehículo de hidrógeno
 - Se aplica un incentivo del 20% sobre el gap económico existente entre los vehículos de hidrógeno y los de combustión fósil.
- **Escenario 2:** Incentivo alto al vehículo de hidrógeno
 - Se aplica un incentivo del 40% sobre el gap económico existente entre los vehículos de hidrógeno y los de combustión fósil.

A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos.

Evolución del parque de vehículos

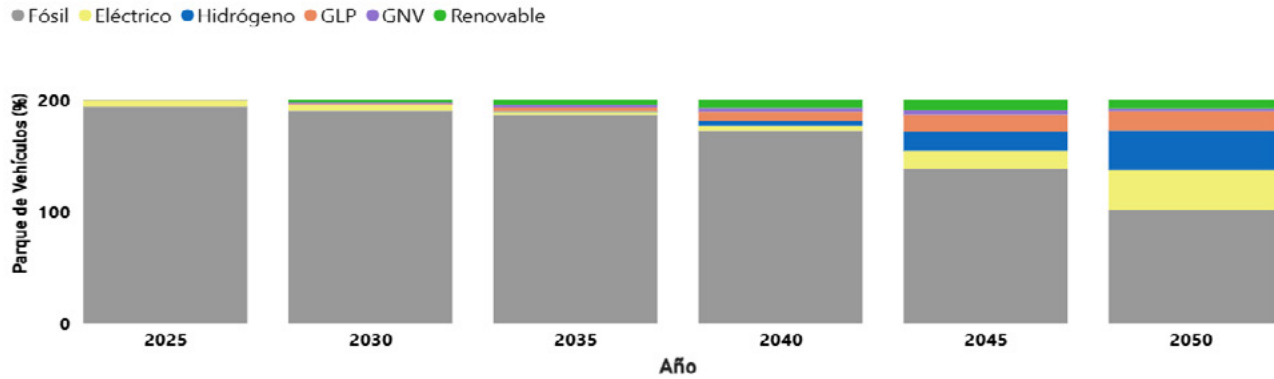
La transición tecnológica del parque automovilístico se refleja de forma clara en ambos escenarios:

En el escenario 1 la adopción de vehículos de hidrógeno emerge como la segunda tecnología predominante a largo plazo después del eléctrico.

Un aspecto interesante es que, aunque los incentivos económicos están disponibles desde una etapa temprana, la adopción del hidrógeno por parte de los agentes no se materializa hasta que su coste se vuelve más competitivo que el de las tecnologías eléctricas.

Esto refleja que, pese a los incentivos iniciales, la madurez tecnológica y el coste relativo siguen siendo factores decisivos en las preferencias de los agentes.

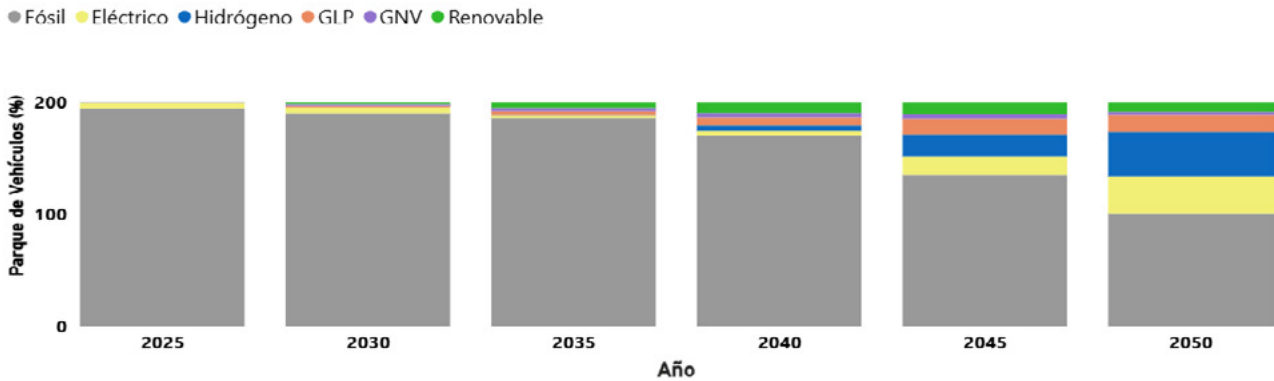
Evolución del parque de vehículos por tecnología (2025–2050)



Gráfica 5. Evolución del parque de vehículos distribuido por las distintas energías.

Para el escenario 2 la evolución es tal que:

Evolución del parque de vehículos por tecnología (2025–2050)



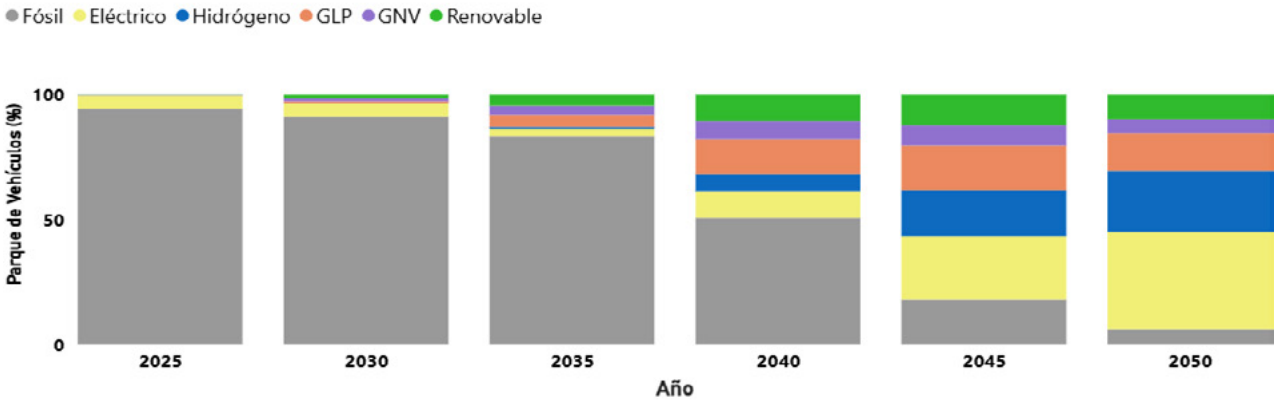
Gráfica 6. Evolución del parque de vehículos distribuido por las distintas energías.

Impacto en las emisiones directas de CO²

Los incentivos tienen un impacto significativo en la reducción de emisiones directas de CO₂.

Los vehículos de hidrógeno no generan emisiones directas por lo que en la gráfica 5 podemos la evolución en el tiempo de las emisiones directas.

Evolución del parque de vehículos por tecnología (2025–2050)



Gráfica 7. Evolución emisiones análisis 2 impulso económico, escenario 2 (40% vehículo H₂).

Coste de la subvención

En el escenario 1, el modelo determinó un coste total de 8.000 millones de euros, lo que se traduce en un gasto promedio anual de

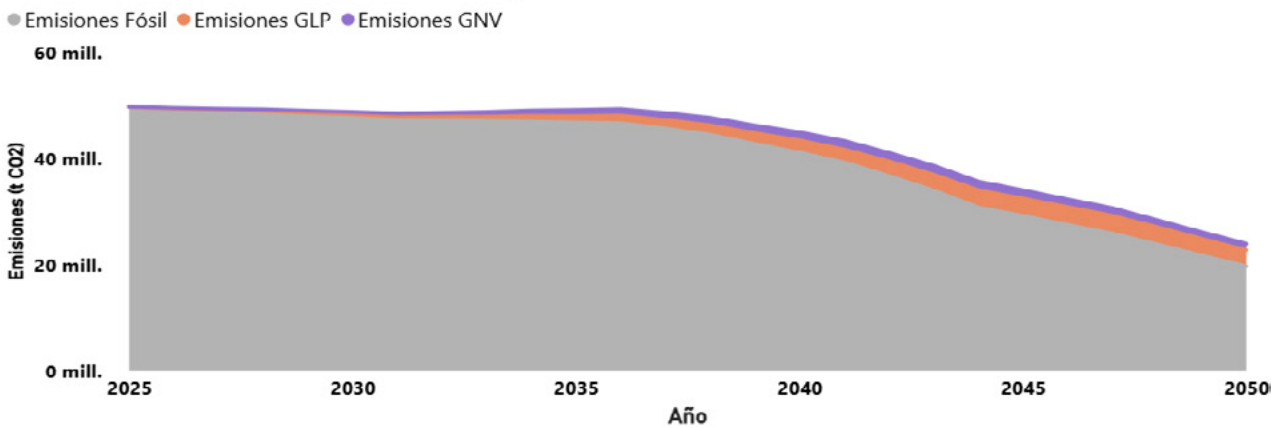
300 millones de euros durante 25 años, representando aproximadamente el 0,1% del presupuesto del estado español.

6.4. Impacto de regulaciones e incentivos en la adopción de vehículos de hidrógeno

Como análisis final, se evalúa el efecto combinado de la implementación de legislaciones restrictivas en 2035 junto con un incentivo del 20% sobre la diferencia de precio entre

vehículos de hidrógeno y aquellos basados en combustibles fósiles derivados del petróleo.

Emisiones Fósil, Emisiones GLP y Emisiones GNV por Año



Gráfica 8. Evolución del parque de vehículos análisis 3 (20% incentivo vehículo H₂ y ley aplicada en 2035).

En la Gráfica 8 se observa la evolución del parque vehicular, donde se destaca un ligero aumento en la adopción del hidrógeno (en torno al 3% más) en comparación con el Análisis 1 y el Escenario 1.

Además, se aprecia la formación de un mix energético equilibrado, ya que ninguna tecnología logra una dominancia absoluta, lo que sugiere un mercado diversificado y competitivo.

Esto evidencia que las medidas regulatorias tienen un impacto aún más significativo en la transición tecnológica que los incentivos económicos pero que mezclando ambos se fomenta más la tecnología deseada.



07/ Conclusiones

Impacto de la normativa europea:

La aplicación de la normativa europea que obliga a los fabricantes a comercializar únicamente vehículos de emisiones cero a partir de 2035 es decisiva de acuerdo con la simulación para la adopción masiva de vehículos impulsados por hidrógeno. Un retraso en su implementación reduce significativamente la adquisición de estas tecnologías limpias, perpetuando la dominancia de los vehículos con emisiones directas de CO₂.

Adopción progresiva del hidrógeno:

La introducción de la ley en 2035 favorecería una adopción gradual del hidrógeno. Para 2040, se proyecta que el hidrógeno represente el 5% del parque vehicular, con concentración en corredores clave como la Autovía Norte, el Corredor Mediterráneo y la autovía del este. Este porcentaje aumentaría a un 16% en 2045 y a un 22% en 2050, resultando en un escenario equilibrado donde ninguna tecnología es claramente dominante.

Efectos de un retraso normativo:

Si la introducción de la ley se postergara hasta 2050 (lo que en el modelo equivaldría a no implementarla), los combustibles fósiles permanecerían como la tecnología dominante al final de la simulación. En este caso, el hidrógeno ocuparía una cuota menor (14% en 2050), con las demás tecnologías prácticamente residuales excepto los vehículos eléctricos que tendrían una cuota reseñable del 30% en 2050.

Limitaciones de los incentivos económicos:

En el análisis del impulso económico, el hidrógeno emerge como una tecnología importante a largo plazo. Sin embargo, no se observa un impacto significativo en la distribución general del parque vehicular de este incentivo. Esto sugiere que, hasta que no se alcance una combinación favorable de parámetros (infraestructura, precios y disponibilidad), los incentivos económicos por sí solos no son suficientes para motivar un cambio masivo.

Combinación de incentivos legislativos y económicos:

La combinación de medidas legislativas y económicas muestra un leve incremento en la adopción de vehículos de hidrógeno respecto a los dos individualmente, en torno a un 3-4 % superior en 2050 de cuota en el parque de vehículos. Sin embargo, los resultados son similares a los obtenidos sin incentivos económicos, lo que destaca la influencia de otras variables críticas, como la infraestructura y las preferencias de los consumidores.

Fortalezas y contribuciones del modelo:

- El modelo se destaca por su robustez para simular múltiples escenarios de transición tecnológica en el sector transporte. Permite evaluar de forma dinámica el impacto de políticas regulatorias y económicas, facilitando la identificación de parámetros críticos para la adopción de tecnologías limpias.
- Al integrar variables clave y permitir ajustes en los supuestos, el modelo se adapta a nuevas informaciones y cambios en las condiciones del mercado. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas, ya que los responsables políticos y planificadores pueden realizar análisis de sensibilidad y ajustar los escenarios según las necesidades.
- Todos los supuestos y datos de entrada están claramente documentados y fundamentados en fuentes reconocidas, lo que aporta credibilidad y facilita futuras actualizaciones del modelo a medida que se disponga de nuevos datos.

Limitaciones y áreas de mejora:

Si bien el modelo ofrece una aproximación realista a la transición energética, se basa en supuestos para las proyecciones a futuro. Además, algunos factores cualitativos, como la aceptación social o barreras culturales, no se incorporan en la simulación. Estas limitaciones representan oportunidades para enriquecer el modelo en futuras versiones y ampliar su capacidad predictiva.

08/ Preguntas frecuentes

P1 - ¿Qué factores influyen en la elección de cambio de vehículo de los agentes?

R: Los agentes eligen cambiar de vehículo en función de una combinación de factores: la disponibilidad de estaciones de repostaje, el costo de energía, el precio del vehículo, la autonomía y el tiempo de repostaje.

Además, la disponibilidad de infraestructura mínima en las rutas de los agentes es un requisito para que puedan considerar tecnologías alternativas.

Esta función de utilidad ponderada permite que cada agente elija una tecnología que se adapte a sus necesidades y contexto.

P2 - ¿Dónde se puede cambiar el precio de la energía?

R: El precio de la energía se puede modificar en las celdas de entrada de datos del modelo. Estas celdas permiten ajustar el costo energético de cada tecnología (fósil, eléctrica, hidrógeno, GLP, GNC, y otras).

Al modificar el precio en €/100 km, se pueden simular diferentes escenarios de mercado para observar cómo el cambio de costo impacta las decisiones de adopción de tecnología.

Estos precios comparativos son una variable clave en la función de utilidad, afectando directamente la preferencia de los agentes por tecnologías con menores costos de energía.

P3 - ¿Dónde se modifican los pesos de la función de adopción?

R: Los pesos de la función de adopción se encuentran en la configuración de la fórmula de utilidad del modelo. Estos pesos permiten ajustar la importancia relativa que los agentes asignan a variables como el precio de la energía, el precio del vehículo, la disponibilidad de estaciones, la autonomía y los tiempos de repostaje.

Al cambiar los pesos, se pueden personalizar las prioridades de los agentes en la toma de decisiones, permitiendo que ciertos factores (por ejemplo, el costo energético o la infraestructura disponible) tengan más influencia sobre la elección de tecnología.

Este ajuste facilita la simulación de distintos perfiles de usuario y escenarios de preferencia en el mercado.

P4- ¿Cómo afecta la entrada en vigor de la restricción de emisiones en el modelo?

R: La restricción de emisiones en el modelo se activa a partir del año especificado en los escenarios de prohibición de combustibles fósiles (por ejemplo, 2035, 2040, 2045 o 2050).

A partir de esa fecha, la tecnología fósil pierde puntuación en la función de utilidad de los agentes y queda descartada como opción para adopción. Esto incrementa la probabilidad de que los agentes elijan tecnologías limpias, como hidrógeno o electricidad, ya que los vehículos fósiles dejan de estar disponibles progresivamente en el mercado.

La entrada en vigor de esta restricción impulsa un cambio hacia tecnologías alternativas y acelera la adopción de estas al reducir la competencia de los combustibles fósiles en el modelo.

P5- ¿Cómo se calculan los incentivos?

R: Los incentivos se calculan como el porcentaje que se bonificaría de la diferencia de precio entre vehículos fósiles y el tipo de energía que ha sido incentivado.

Por ejemplo, si el coche eléctrico se incentiva un 50%, quiere decir que si la diferencia son 10.000 €, el incentivo aplicado será de 5.000 €.

09/ Glosario y bibliografía

9.1 Glosario

1. Adopción tecnológica:

Proceso mediante el cual los usuarios adoptan nuevas tecnologías en función de diferentes factores.

2. Agente:

Entidad representativa en el modelo multiagente que simula a un usuario (vehículo) o a una infraestructura (estación de repostaje), la cual toma decisiones basadas en variables definidas.

3. Autonomía:

Distancia máxima que un vehículo puede recorrer con una carga completa o depósito lleno, sin necesidad de reabastecimiento.

4. Biocombustibles:

Combustibles derivados de materias orgánicas (por ejemplo, biodiésel y bioetanol) que se utilizan como alternativas a los combustibles fósiles.

5. Combustibles fósiles:

Fuentes de energía no renovables, como el petróleo, el diésel y la gasolina, utilizadas tradicionalmente en vehículos de combustión interna.

6. Escenario:

Configuración específica de condiciones y supuestos en el modelo, que simula el impacto de distintas políticas (legislativas o económicas) en la adopción de tecnologías alternativas.

7. FCEV:

Los coches FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle, que se traduce como coche eléctrico de pila de combustible) son un tipo de vehículo eléctrico que funciona como alternativa a los vehículos eléctricos de batería.

En lugar de depender de una batería, utiliza una celda de combustible para generar energía eléctrica. Esta celda o pila de combustible aprovecha hidrógeno y oxígeno del aire para alimentar el motor eléctrico.

8. GLP (Gas licuado de petróleo):

Combustible alternativo compuesto principalmente por propano y butano, utilizado en automoción por su bajo coste y reducidas emisiones.

9. GNV (Gas natural vehicular):

Se denomina gas natural vehicular (abreviado comúnmente con las siglas GNV) al gas natural de automoción, utilizado como combustible para vehículos autopropulsados.

10. IMD:

La intensidad media diaria, de manera abreviada IMD, es una medida utilizada principalmente en la planificación del transporte, la ingeniería del transporte y la selección de ubicaciones minoristas. Es el volumen total de tráfico de vehículos de una carretera durante un año dividido por 365 días.

11. Incentivos económicos:

Medidas financieras (como descuentos, subsidios o apoyos) diseñadas para reducir el costo de adquisición de tecnologías limpias y fomentar su adopción.

12. Infraestructura de repostaje:

Instalaciones necesarias para suministrar combustibles a los vehículos, incluyendo tanques, surtidores y sistemas de compresión en el caso del hidrógeno.

13. Modelos multiagente:

Simulaciones computacionales que representan interacciones entre agentes autónomos, como usuarios de vehículos y estaciones de servicio.

14. Normativa europea:

Conjunto de directrices y leyes establecidas a nivel europeo para regular la comercialización y uso de vehículos, que en este informe incluye la obligación de ofrecer únicamente vehículos de emisiones cero a partir de 2035.

15. Ruta interurbana:

Corredores de tráfico que conectan ciudades y zonas metropolitanas, críticos para la movilidad de larga distancia.

16. Supuestos:

Hipótesis y condiciones predefinidas en el modelo que permiten simular escenarios futuros, especialmente en ausencia de datos históricos precisos sobre tendencias a largo plazo.

17. Vehículo eléctrico:

Automóvil impulsado por baterías recargables, caracterizado por su eficiencia y ausencia de emisiones directas.

9.2 Bibliografía

1. **Agencia Europea de Energía (2023).** Ley 2023/80570: Regulación sobre combustibles alternativos y sostenibilidad. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-80570>.

2. **Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC) (2024).** Informe Ideauto: Parque de vehículos en España 2023. Recuperado de <https://anfac.com/wp-content/uploads/2024/02/Informe-Ideauto-Parque-de-Vehiculos-Espana-2023.pdf>.

3. **Dirección General de Tráfico (DGT) (2023).** Parque de vehículos: Tablas estadísticas 2023. Recuperado de <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Parque-de-vehiculos-Tablas-Estadisticas-2023/>.

4. **Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2024).** Coste por 100 km en diferentes tipos de vehículos. Recuperado de <https://eurospor100km.energia.gob.es/Paginas/coste%E2%82%AC100km.aspx#consulta-marca>.

5. **Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2023).** World Energy Outlook 2023. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>.

6. **Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2023).** Global EV Outlook 2023. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.

7. **Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2024).** Gas Market Report, Q3 2024. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q3-2024>.

8. **Agencia Internacional de la Energía (IEA) (2023).** Renewables 2023. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.

9. **Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) (2023).** Renewable Power Generation Costs in 2022. Recuperado de <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>.

10. **Toyota España (2024).** Toyota Mirai. Recuperado de <https://www.toyota.es/coches/mirai>.

11. **Audi España (2024).** Audi A5. Recuperado de <https://www.audi.es/es/web/es/modelos/a5/a5.html>.

12. **BYD España (2024).** BYD Seal. Recuperado de <https://www.byd.com/es-es/configurador/seal>.



APRENDE *TRANSFORMA* IMPACTA