



X InnovAuto UPM





Décimas Jornadas Universitaria sobre Innovación y Retos en Automoción

X InnovAuto



Instituto Universitario de
Investigación del Automóvil
Francisco Aparicio Izquierdo



Madrid, 16 de mayo de 2024

Décimas Jornadas Universitarias sobre Innovación y Retos en Automoción

I.S.B.N.: 978-84-18255-82-3

Depósito Legal: M-14957-2026

Editorial: Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid

<https://www.fgupm.es>



Décimas Jornadas Universitarias sobre
Innovación y Retos en **Auto**movión

X InnovAuto

***Descarbonización del transporte. Retos y
alternativas***

Editora: Blanca Arenas Ramírez

Colaboran:



Instituto Universitario de
Investigación del Automóvil
Francisco Aparicio Izquierdo



ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE PROFESIONALES DE AUTOMOCIÓN



división de ingeniería de máquinas

CÁTEDRA DE
**TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



REPSOL
Fundación

Participa:



Los profesores del Grupo de Ingeniería de Vehículos y Transporte de la ETSII:

Enrique Alcalá Fazio

Blanca Arenas Ramírez

Felipe Jiménez Alonso

Luis Martínez Sáez

Javier Páez Ayuso

y el profesor emérito UPM:

Francisco Aparicio Izquierdo

agradecen a los alumnos organizadores el entusiasmo y la dedicación a esta actividad.

PRÓLOGO

Las *X Jornadas universitarias sobre retos e innovación en automoción: Descarbonización del transporte. Retos y alternativas*, organizada y protagonizada por alumnos del Máster en Ingeniería Industrial (MII), es el acto central de la asignatura “Organización, desarrollo y participación en eventos de difusión científica” orientada a la adquisición de competencias. La asignatura del plan de estudios del MII, bajo la responsabilidad de los profesores de la Unidad Docente de Ingeniería de Transportes del Departamento de Ingeniería Mecánica (DIMEC) de la ETSII y del Grupo de Investigación en Seguridad e Impacto Medioambiental de Vehículos y Transportes (GIVET), e investigadores del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil Francisco Aparicio Izquierdo (INSIA-UPM), se centra en el desarrollo de un “evento de difusión científica” en temas de actualidad en el ámbito de los vehículos automóviles.

La participación activa de los 6 alumnos de esta edición se extendió a todas las etapas de su organización y desarrollo: definición del público objetivo, elección del tema, selección de los contenidos, diseño de los medios de difusión, preparación de las ponencias, diseño y preparación del material de apoyo y, finalmente, su exposición. La actitud y el trabajo de los estudiantes participantes en esta actividad fue excelente y culminó en un evento de elevada calidad de las presentaciones y de los documentos de los temas desarrollados que forman parte de la décima monografía *InnovAuto – UPM*. El evento fue patrocinado por la Cátedra UPM Fundación Repsol de Transición Energética, dentro de la línea de actuación de tecnologías emergentes.

En esta edición se desarrolló un estudio sobre combustibles renovables y las tecnologías derivadas del hidrógeno, que se presentan como una solución prometedora para la descarbonización del transporte de mercancías y viajeros a larga distancia.

En esta décima monografía, los trabajos se organizan en dos bloques:

- Bloque I: Combustibles renovables: biocombustibles, combustibles sintéticos e hidrógeno
- Bloque II: Ámbitos y experiencias de utilización de combustibles renovables

Como Catedrático de la ETSII y director del GIVET, y en nombre de los profesores e investigadores tutores de los alumnos, considero que la experiencia ha cumplido ampliamente sus objetivos, constituye una actividad formativa de gran valor para la adquisición de competencias por parte de los estudiantes y, al mismo tiempo, aporta conocimientos actualizados a ellos mismos y a los asistentes al evento.

Deseo expresar el más profundo agradecimiento a la ponente invitada: Dña. MARINA ALEXANDRA CHIRITA, científica en diseño de productos en Repsol Technology Lab, por la conferencia **“Combustibles renovables: una solución cero emisiones netas de CO₂ para el transporte pesado por carretera”**, a la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII-UPM)*, al *Instituto Universitario de Investigación del Automóvil Francisco Aparicio Izquierdo (INSIA-UPM)* y a la *Asociación Española de Profesionales de la Automoción (ASEPA)*, por la acogida y apoyo prestado al desarrollo de las Jornadas.

Deseo felicitar a los alumnos organizadores de las Jornadas y autores de los capítulos de la monografía *X InnovAuto – UPM*, a los profesores tutores y a Dña. Edinalva Gomes Bastos por la tarea de compilación y maquetación de esta Monografía.

Prof. Felipe Jiménez Alonso

Catedrático de Universidad

Director del GIVET

ÍNDICE

BLOQUE I: Combustibles renovables: biocombustibles, combustibles sintéticos e hidrógeno.....	9
1. Biocombustibles: tipos, materias primas y tecnologías de producción <i>Por Jacobo Garrido Delgado</i>	11
2. Tecnologías y experiencias de instalaciones de captura de CO ₂ de la atmósfera <i>Por Lucas San José Alarcón</i>	29
3. Requerimientos de los motores de combustión interna para el uso eficiente de biocombustibles <i>Por Guillermo San Antolín Anaya</i>	49
BLOQUE II: Ámbitos y experiencias de utilización de combustibles renovables.....	69
4. Combustible renovable en el transporte pesado. Presente y retos futuros <i>Por Juan Pedro Tabera Martín</i>	71
5. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte pesado de mercancías <i>Por Eduardo Moya García</i>	89
6. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte público de personas <i>Por Javier Arias Buzunáriz</i>	113

BLOQUE I

Combustibles renovables: biocombustibles, combustibles sintéticos e hidrógeno

1. Biocombustibles: tipos, materias primas y tecnologías de producción

Jacobo Garrido Delgado

ABSTRACT

Biofuels are renewable fuels derived from biomass, an alternative to fossil fuels that reduces CO₂ emissions and energy dependence. They are classified into liquids (biodiesel, bioethanol, biokerosene), gaseous (biogas, biohydrogen) and solids (wood-based biofuels, pellets, briquettes). Its raw materials include energy crops (sugarcane, corn), agricultural and forestry residues (crop residues, wood chips) and algae. Production technologies vary depending on the type of biofuel: fermentation for bioethanol and biogas, transesterification for biodiesel, gasification for biogas and biohydrogen, and combustion for solid biofuels.

The advantages of biofuels include the reduction of CO₂ emissions, the diversification of the energy matrix and the creation of rural jobs. However, there are also challenges such as the sustainability of commodity production, environmental impacts (deforestation, land-use change) and production costs.

Keywords: Biodiesel, Bioethanol, Biogas, Biohydrogen, First Generation Biofuels, Second Generation Biofuels, Third Generation Biofuels, Energy Crops, Agricultural and Forestry Residues, Algae, Fermentation, Transesterification, Gasification, Combustion, CO₂ Emissions, Climate Change, Environmental Impacts, Energy Efficiency

RESUMEN

Los biocombustibles son combustibles renovables derivados de la biomasa, una alternativa a los combustibles fósiles que reduce las emisiones de CO₂ y la dependencia energética. Se clasifican en líquidos (biodiesel, bioetanol, bioqueroseno), gaseosos (biogás, biohidrógeno) y sólidos (biocombustibles a base de madera, pellets, briquetas). Sus materias primas incluyen cultivos energéticos (caña de azúcar, maíz), residuos agrícolas y forestales (restos de cosechas, astillas de madera) y algas. Las tecnologías de producción varían según el tipo de biocombustible: fermentación para bioetanol y biogás, transesterificación para biodiesel, gasificación para biogás y biohidrógeno, y combustión para biocombustibles sólidos.

Las ventajas de los biocombustibles incluyen la reducción de emisiones de CO₂, la diversificación de la matriz energética y la creación de empleos rurales. Pero también hay desafíos como la sostenibilidad de la producción de materias primas, los impactos ambientales (deforestación, cambio de uso del suelo) y los costos de producción.

Palabras clave: Biodiesel, Bioetanol, Biogás, Biohidrógeno, Biocombustibles de primera generación, Biocombustibles de segunda generación, Biocombustibles de

tercera generación, Cultivos energéticos, Residuos agrícolas y forestales, Algas, Fermentación, Transesterificación, Gasificación, Combustión, Emisiones de CO₂, Cambio climático, Impactos ambientales, Eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

En un contexto de creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la seguridad energética, los biocombustibles emergen como una alternativa viable a los combustibles fósiles tradicionales. Estos combustibles, derivados de la biomasa, ofrecen la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar la matriz energética, impulsando a su vez el desarrollo rural y la creación de empleos.

En este trabajo, se abordará en detalle el tema de los biocombustibles, explorando sus diferentes tipos, las materias primas que se utilizan para su producción y las tecnologías de producción más comunes. Se analizarán las ventajas y desventajas de su uso, así como su papel en la mitigación del cambio climático y la transición hacia un futuro energético más sostenible.

A continuación, se presentan los principales apartados que se desarrollarán:

1. Tipos de biocombustibles: Se clasificarán los biocombustibles según su estado físico (líquidos, gaseosos y sólidos), y por su origen (Primera, Segunda o Tercera Generación). Además, se describirán ejemplos específicos de cada tipo.

2. Materias primas: Se analizarán las diferentes fuentes de biomasa que se pueden utilizar para la producción de biocombustibles, incluyendo cultivos energéticos, residuos agrícolas y forestales y algas.

3. Tecnologías de producción: Se describirán las tecnologías más comunes para la producción de cada tipo de biocombustible, incluyendo la fermentación, la transesterificación, la gasificación y la combustión.

4. Aclaraciones: Se realizarán algunas aclaraciones sobre términos que suelen inducir a confusión.

5. Datos relevantes: Se incluirán datos de interés sobre la materia.

6. Sostenibilidad: Se discutirá la importancia de la sostenibilidad en la producción de biocombustibles, considerando los impactos ambientales y sociales potenciales.

7. Conclusiones: Se sintetizarán los puntos clave del trabajo y se destacará el papel de los biocombustibles en la construcción de un futuro energético más sostenible.

2. TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son combustibles renovables derivados de la biomasa, materia orgánica de origen vegetal o animal. Se presentan como una alternativa a los combustibles fósiles, con potencial para reducir las emisiones de CO₂ y la dependencia energética.

En este documento, se realiza una clasificación detallada de los diferentes tipos de biocombustibles, atendiendo a su estado físico, origen y generación. Se describen sus características, aplicaciones y ejemplos específicos.

2.1. Clasificación por Estado Físico

• Biocombustibles Líquidos

- **Biodiesel:** Se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales mediante un proceso de transesterificación. Se utiliza principalmente en motores diésel.
- **Bioetanol:** Se produce a partir de la fermentación de azúcares y almidones de cultivos como la caña de azúcar, el maíz o la remolacha azucarera. Se utiliza principalmente en motores de gasolina.
- **Bioqueroseno:** Se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales mediante un proceso de hidrotratamiento. Se utiliza principalmente en la aviación.



Figura 1. Generación de biodiésel a partir de girasoles (Imagen propia)

• Biocombustibles Gaseosos

- **Biogás:** Se produce a partir de la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Se compone principalmente de metano y dióxido de carbono. Se puede utilizar para la generación de energía eléctrica o térmica, o como combustible para vehículos.
- **Biohidrógeno:** Se produce a partir de diversos procesos, como la gasificación de biomasa o la electrólisis del agua. Se puede utilizar como combustible para vehículos o para la generación de energía eléctrica.

• Biocombustibles Sólidos:

- **Biocombustibles a base de madera:** Leña, pellets, briquetas. Se utilizan principalmente para la generación de energía térmica.
- **Carbón vegetal:** Se produce a partir de la carbonización de madera. Se utiliza principalmente como combustible industrial.



Figura 2. Biocombustibles sólidos (Imagen propia)

2.2. Clasificación por Origen

- **Biocombustibles de Primera Generación:** Se producen a partir de cultivos energéticos como la caña de azúcar, el maíz o la palma africana. Estos cultivos pueden competir con la producción de alimentos y generar impactos ambientales negativos como la deforestación.
- **Biocombustibles de Segunda Generación:** Se producen a partir de residuos agrícolas y forestales, como tallos, hojas, ramas y cortezas (biomasa lignocelulósica). Estos residuos no compiten con la producción de alimentos y tienen un menor impacto ambiental que los biocombustibles de primera generación.
- **Biocombustibles de Tercera Generación:** Se producen a partir de algas y microalgas. Estas materias primas no compiten con la producción de alimentos y tienen un alto potencial de producción.

2.3. Ejemplos de Biocombustibles

- **Biodiesel:** B100 (biodiesel puro), B20 (mezcla de 20% de biodiesel y 80% de diésel), HVO (aceite vegetal hidrotratado).
- **Bioetanol:** E10 (mezcla de 10% de bioetanol y 90% de gasolina), E85 (mezcla de 85% de bioetanol y 15% de gasolina).
- **Biogás:** Biometano (biogás purificado), bio-GNL (biogás licuado).
- **Biohidrógeno:** producido mediante electrólisis renovable

- **Hidrógeno verde:** producido a partir de biomasa mediante procesos biológicos o termoquímicos.
- **Biocombustibles sólidos:** Pellets de madera, briquetas de madera, carbón vegetal.

2.4. Consideraciones Finales

La elección del tipo de biocombustible más adecuado dependerá de diversos factores, como la disponibilidad de materias primas, la infraestructura existente y las necesidades específicas del sector energético. Es importante destacar que la producción y el uso de biocombustibles deben ser sostenibles para evitar impactos ambientales negativos.



Figura 3. Abstracción Elección tipo de biocombustible (Imagen propia)

3. MATERIA PRIMA DE BIOCOMBUSTIBLES

La materia prima es el componente fundamental para la producción de biocombustibles. Se refiere a cualquier material biológico renovable que pueda ser transformado en energía. La elección de la materia prima adecuada es crucial para la sostenibilidad, eficiencia y viabilidad económica de la producción de biocombustibles.

3.1. Tipos de materia prima para biocombustibles

Las principales categorías de materia prima para biocombustibles son:

- **Cultivos energéticos:** Son plantas cultivadas específicamente para la producción de biocombustibles. Algunos ejemplos incluyen:

- **Caña de azúcar:** Utilizada para la producción de bioetanol.
- **Maíz:** Utilizado para la producción de bioetanol y biodiésel.
- **Palma africana:** Utilizada para la producción de biodiésel.
- **Jatropha:** Cultivo no alimenticio con potencial para la producción de biodiésel.
- **Residuos agrícolas y forestales:** Son materiales de desecho que provienen de actividades agrícolas y forestales. Algunos ejemplos incluyen:
 - Restos de cosechas: Tallos, hojas, cáscaras y otros residuos de cultivos.
 - Astillas de madera: Residuos de la tala de árboles y poda.
 - Estiércol: Residuos animales de granjas.
- **Algas:** Son organismos fotosintéticos que pueden ser cultivados en sistemas acuáticos para la producción de biocombustibles. Las algas tienen un alto potencial por su rápido crecimiento y su capacidad para producir aceite.

3.2. Sostenibilidad de la materia prima

La sostenibilidad de la materia prima es un aspecto fundamental para el desarrollo de la industria de biocombustibles. Se debe asegurar que la producción de la materia prima no tenga impactos negativos en el medio ambiente, como la deforestación, la pérdida de biodiversidad o la degradación del suelo.

3.3. Criterios para la selección de materia prima sostenible

- **Disponibilidad:** La materia prima debe ser abundante y renovable.
- **Eficiencia:** La materia prima debe tener un alto contenido energético y ser fácil de convertir en biocombustibles.
- **Sostenibilidad:** La producción de la materia prima no debe tener impactos negativos en el medio ambiente.
- **Impactos sociales:** La producción de la materia prima debe generar beneficios para las comunidades locales.

3.4. Promoción sostenibilidad de materia prima

- **Certificaciones de sostenibilidad:** Existen diferentes certificaciones que garantizan que la materia prima ha sido producida de manera sostenible.
- **Buenas prácticas agrícolas:** Se promueven prácticas agrícolas sostenibles para minimizar los impactos ambientales de la producción de materia prima.

- **Investigación e innovación:** Se busca desarrollar nuevas tecnologías para la producción de biocombustibles a partir de materias primas más sostenibles.



Figura 4. Ilustración materia prima de biocombustibles (Imagen propia)

4. TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Las tecnologías de producción de biocombustibles son los procesos que se utilizan para convertir la materia prima en energía utilizable. La elección de la tecnología adecuada depende del tipo de biocombustible que se desea producir, la materia prima disponible y los objetivos económicos y ambientales.

4.1. Principales tecnologías de producción

- **Procesos de fermentación:** Se utilizan para la producción de bioetanol y biogás a partir de azúcares y almidones. La fermentación es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en productos como el alcohol y el gas.
- **Procesos de transesterificación:** Se utilizan para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales y grasas animales. La transesterificación es un proceso químico en el que se produce una reacción entre el aceite y un alcohol para obtener biodiesel y glicerina.
- **Procesos de gasificación:** La gasificación de biomasa genera un gas de síntesis rico en CO, H₂ y CH₄, que puede emplearse para producir biohidrógeno. La gasificación es un proceso termoquímico en el que la biomasa se convierte en un gas combustible (syngas) mediante la aplicación de calor y un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua).

- **Procesos de combustión:** Se utilizan para la producción de energía a partir de biocombustibles sólidos como la leña, pellets y briquetas. La combustión es un proceso químico en el que la biomasa se oxida en presencia de oxígeno para liberar calor.

4.2. Tecnologías emergentes

- **Procesos de biocatálisis:** Se utilizan enzimas para convertir la biomasa en biocombustibles. La biocatálisis ofrece una alternativa más sostenible a los procesos tradicionales.
- **Procesos de pirólisis:** Se utiliza la descomposición térmica de la biomasa para producir biocombustibles líquidos y gases. La pirólisis es un proceso prometedor para la producción de biocombustibles de segunda generación.
- **Procesos de licuefacción:** Se utiliza la conversión de la biomasa en biocombustibles líquidos mediante la aplicación de calor y presión. La licuefacción es una tecnología versátil que puede utilizarse para producir biocombustibles a partir de una amplia gama de materias primas.

4.3. Aclaraciones terminológicas

4.3.1. Bioetanol vs. Biodiésel

- **Materia prima:**
 - **Bioetanol:** Cultivos como caña de azúcar, maíz (azúcares y almidones).
 - **Biodiésel:** Aceites vegetales y grasas animales.
- **Proceso:**
 - **Bioetanol:** Fermentación.
 - **Biodiésel:** Transesterificación.
- **Producto final:**
 - **Bioetanol:** Alcohol líquido.
 - **Biodiésel:** Combustible similar al diésel.

4.3.2. Primera vs. Segunda / Tercera generación

- **Primera generación:** Cultivos energéticos como materia prima (impactos ambientales).
- **Segunda y tercera generación:** Residuos agrícolas y forestales (biomasa lignocelulósica o residuos lignocelulósicos y no alimentarios) y algas o microalgas respectivamente (menor impacto ambiental).

4.3.3. Pirólisis vs. Combustión

- **Pirólisis:** Descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Produce biocarbón, bioaceite y gas de síntesis.
- **Combustión:** Quema de la biomasa en presencia de oxígeno. Produce calor y gases de combustión.
- **Eficiencia:** En ciertos casos, la pirólisis produce menos emisiones atmosféricas que la combustión directa. .

4.3.4. Licuefacción vs. Gasificación

- **Licuefacción:** Conversión de la biomasa en biocombustibles líquidos mediante calor y presión.
- **Gasificación:** Conversión de la biomasa en gas combustible (syngas) mediante calor y un agente gasificante.

4.3.5. Biocatálisis

- **Tecnología emergente:** Utiliza enzimas para convertir la biomasa en biocombustibles. Ofrece una alternativa más sostenible a los procesos tradicionales.

4.4. Organizaciones internacionales

- **FAO:** La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ofrece datos sobre la producción de cultivos para biocombustibles a nivel mundial. En su página web se pueden encontrar estadísticas por país, tipo de cultivo y año.
- **OECD:** La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) también publica datos sobre la producción de biocombustibles y el uso de la tierra. Su página web ofrece información sobre las políticas de biocombustibles en los países miembros.
- **EUROSTAT:** La oficina estadística de la Unión Europea (EUROSTAT) proporciona datos sobre la producción de biocombustibles en la UE, así como sobre la superficie dedicada a los cultivos energéticos.
- **Agencia Internacional de la Energía (AIE):** La AIE proporciona datos sobre la producción y el consumo de biocombustibles en sus diferentes publicaciones. En su página web se pueden encontrar estadísticas por país y tipo de biocombustible: <https://www.iea.org/reports/biofuels>

4.5. Informes y estudios

- **Global Biofuels Outlook:** Este informe anual del USDA ofrece una perspectiva global sobre el mercado de biocombustibles, incluyendo datos

sobre la producción, el consumo y la extensión de cultivos: <https://fas.usda.gov/data/commodities/biofuels>

- **The Biofuels Digest:** Esta publicación online ofrece noticias, análisis y datos sobre la industria de los biocombustibles: <https://www.biofuelsdigest.com/>
- **RFA: Renewable Fuels Association:** La Asociación de Combustibles Renovables (RFA) de Estados Unidos publica informes sobre el impacto económico y ambiental de los biocombustibles: <https://www.rfa.org/>



Figura 5. Logos Organizaciones Internacionales

4.6. Evolución en los últimos 20-30 años

- La superficie dedicada a los cultivos para biocombustibles ha aumentado significativamente en los últimos 20-30 años.
- En 2000, la superficie mundial dedicada a los cultivos para biocombustibles era de alrededor de 20 millones de hectáreas.
- En 2020, esta superficie había aumentado a alrededor de 70 millones de hectáreas.
- Los principales cultivos para biocombustibles son la caña de azúcar, la soja, el maíz y el aceite de palma.
- El crecimiento de la producción de biocombustibles ha sido impulsado por las políticas de apoyo a las energías renovables y la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles.

4.7. Controversias

- La expansión de los cultivos para biocombustibles ha generado controversia debido a su impacto potencial en la seguridad alimentaria, el cambio climático y la deforestación.
- Es importante que la producción de biocombustibles se desarrolle de manera sostenible, minimizando estos impactos negativos.

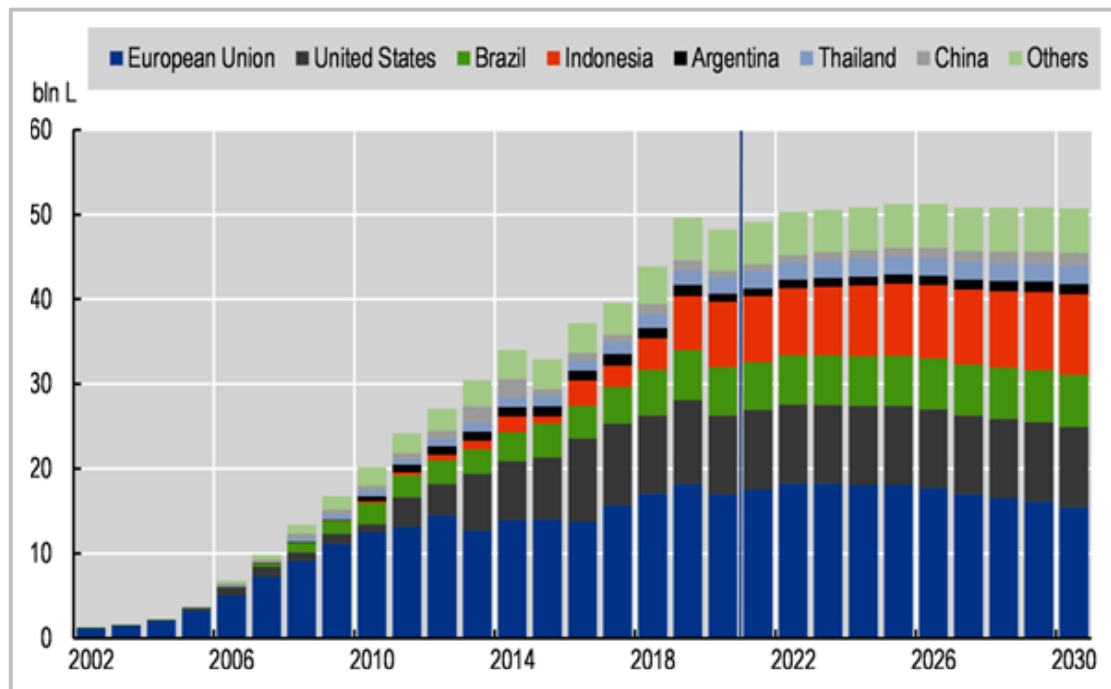


Figura 6. Evolución del consumo mundial de biodiesel. Obtenido de [10]

4.8. Datos de producción de biocombustibles

4.8.1. España

- **Producción de biocombustibles:** En 2020, España produjo 2,8 millones de toneladas de biocombustibles.
- **Superficie dedicada a cultivos energéticos:** En 2020, la superficie dedicada a cultivos energéticos en España era de 1,2 millones de hectáreas.
- **Porcentaje de biocombustibles en el consumo total de energía:** En 2020, los biocombustibles representaron el 5,8% del consumo total de energía en España.

4.8.2. Europa

- **Producción de biocombustibles:** En 2020, la UE produjo 17,5 millones de toneladas de biocombustibles.

- **Superficie dedicada a cultivos energéticos:** En 2020, la superficie dedicada a cultivos energéticos en la UE era de 10,7 millones de hectáreas.
- **Porcentaje de biocombustibles en el consumo total de energía:** En 2020, los biocombustibles representaron el 7,5% del consumo total de energía en la UE.

4.8.3. Países más desarrollados

- **Estados Unidos:** En 2020, Estados Unidos produjo 61,3 millones de toneladas de biocombustibles.
- **Brasil:** En 2020, Brasil produjo 33,5 millones de toneladas de biocombustibles.
- **Indonesia:** En 2020, Indonesia produjo 31,4 millones de toneladas de biocombustibles.

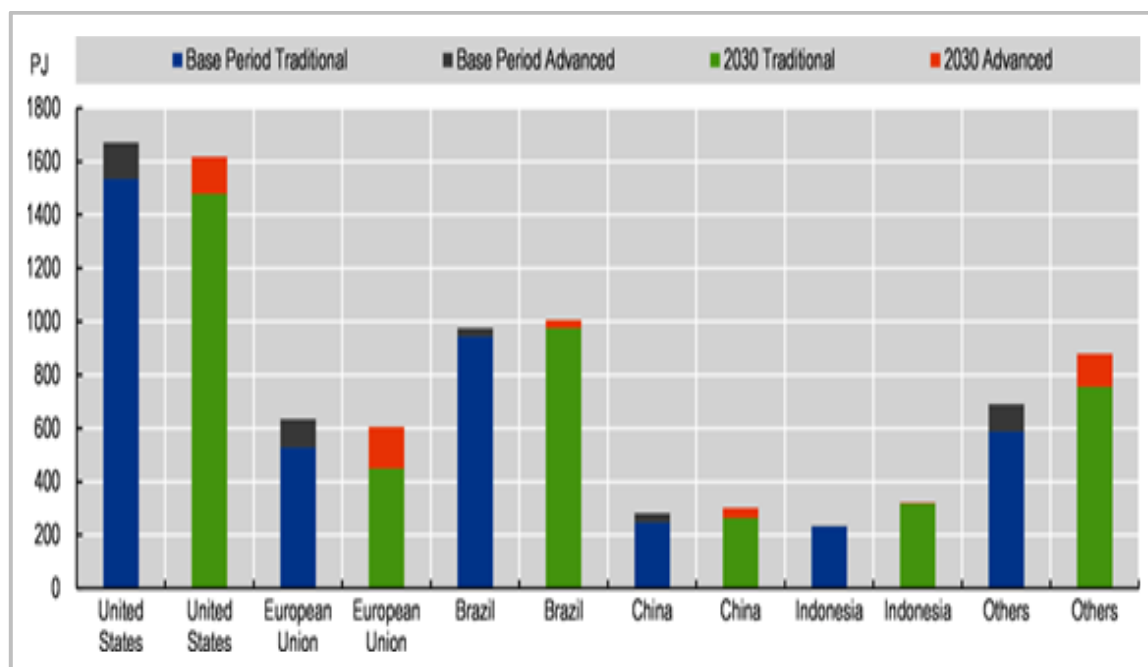


Figura 7. Producción mundial de biocombustibles a partir de materias primas tradicionales y avanzadas. Obtenido de [10]

Las materias primas tradicionales se definen en la imagen como biocombustibles basados en cultivos alimentarios y forrajeros. Valores en Petajulios.

4.9. Proyecciones del parque de biocombustibles

- La AIE proyecta que la producción mundial de biocombustibles podría aumentar hasta 440 millones de toneladas en 2040.
- Este crecimiento dependerá de las políticas de apoyo a las energías renovables, el desarrollo de nuevas tecnologías y la disponibilidad de recursos.

- El crecimiento del parque de biocombustibles podría tener un impacto significativo en la superficie dedicada a los cultivos energéticos.
- Es importante que la producción de biocombustibles se desarrolle de manera sostenible, minimizando el impacto en la seguridad alimentaria, el cambio climático y la deforestación.

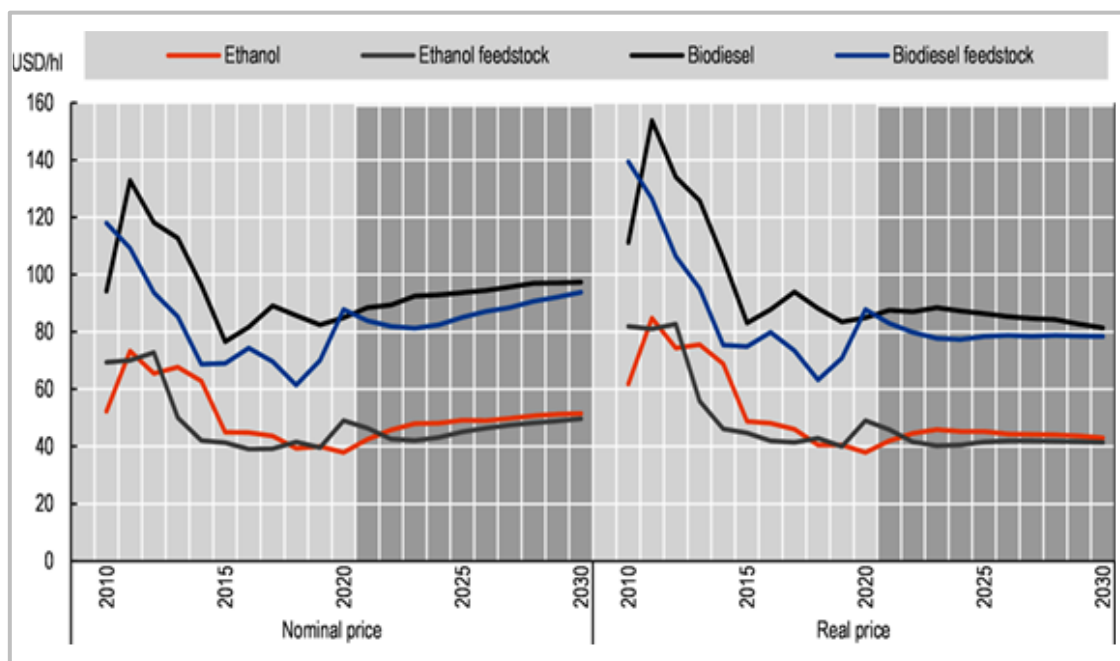


Figura 8. Evolución de los precios de los biocombustibles y de las materias primas para biocombustibles. Obtenido de [10]

4.10. Sostenibilidad

La sostenibilidad es un pilar fundamental en la producción de biocombustibles. Si bien estos combustibles ofrecen una alternativa a los combustibles fósiles, su producción puede generar impactos ambientales y sociales negativos. Es crucial asegurar que la producción de biocombustibles se desarrolle de manera responsable, minimizando estos impactos y maximizando los beneficios.

4.10.1. Impactos Ambientales

- **Deforestación:** La expansión de cultivos energéticos puede conducir a la deforestación, con graves consecuencias para la biodiversidad, el cambio climático y el ciclo del agua.
- **Cambio de uso del suelo:** La conversión de tierras agrícolas a la producción de biocombustibles puede afectar la seguridad alimentaria y el acceso a la tierra.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** La producción de biocombustibles puede generar emisiones de GEI, especialmente si no se utilizan prácticas sostenibles.

- **Contaminación del agua:** El uso de fertilizantes y pesticidas en los cultivos energéticos puede contaminar las fuentes de agua.

4.10.2. Impactos Sociales

- **Derechos de las comunidades locales:** La producción de biocombustibles puede afectar los derechos de las comunidades locales a la tierra, el agua y los recursos naturales.
- **Condiciones laborales:** Los trabajadores del sector de biocombustibles pueden enfrentar condiciones precarias, incluyendo bajos salarios y falta de seguridad social.
- **Seguridad alimentaria:** La producción de biocombustibles puede competir con la producción de alimentos, aumentando los precios y la inseguridad alimentaria.

4.10.3. Estrategias para la Sostenibilidad

- **Certificación de sostenibilidad:** Existen diferentes certificaciones que garantizan que la producción de biocombustibles cumple con criterios ambientales y sociales.
- **Buenas prácticas agrícolas:** La implementación de buenas prácticas agrícolas puede minimizar los impactos ambientales de la producción de biocombustibles.
- **Investigación e innovación:** Se busca desarrollar nuevas tecnologías de producción de biocombustibles más eficientes y sostenibles.
- **Políticas públicas:** Los gobiernos pueden implementar políticas públicas que fomenten la producción sostenible de biocombustibles.

4.10.4. Algunas Iniciativas de promoción

- **Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles (RSB):** Esta iniciativa global reúne a diferentes actores del sector para promover la sostenibilidad en la producción de biocombustibles.
- **Bonsucro:** Es una certificación de sostenibilidad para la producción de caña de azúcar que asegura el cumplimiento de criterios ambientales y sociales.
- **RED II:** La Directiva Europea sobre Energías Renovables II establece requisitos de sostenibilidad para la producción de biocombustibles utilizados en la Unión Europea.

4.11. Conclusiones

La sostenibilidad es un desafío clave para el desarrollo de la industria de biocombustibles. Es necesario un esfuerzo conjunto de todos los actores

involucrados para asegurar que la producción de biocombustibles se desarrolle de manera responsable, minimizando los impactos ambientales y sociales y maximizando los beneficios.



Figura 9. Logos de iniciativas de promoción sostenibles

5. CONCLUSIONES

1. Potencial de los biocombustibles

- Los biocombustibles ofrecen una alternativa renovable y sostenible a los combustibles fósiles.
- Pueden contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio climático.
- Diversifican la matriz energética y aumentan la seguridad energética.

2. Desafíos de la sostenibilidad

- La producción de biocombustibles puede generar impactos ambientales y sociales negativos si no se realiza de manera responsable.
- Es crucial asegurar la sostenibilidad de la producción de biocombustibles a través de la certificación, buenas prácticas, investigación e innovación, y políticas públicas.

3. Tecnologías de producción

- Existen diferentes tecnologías para la producción de biocombustibles a partir de diversas materias primas.
- La elección de la tecnología depende del tipo de biocombustible, la materia prima disponible y los objetivos económicos y ambientales.

- Se requiere investigación e innovación para desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles.

4. Impactos ambientales

- La producción de biocombustibles puede afectar la deforestación, el cambio de uso del suelo, las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del agua.
- Es necesario minimizar estos impactos mediante la implementación de buenas prácticas agrícolas y el desarrollo de tecnologías más eficientes.

5. Impactos sociales

- La producción de biocombustibles puede afectar los derechos de las comunidades locales, las condiciones laborales y la seguridad alimentaria.
- Se deben implementar medidas para asegurar que la producción de biocombustibles respete los derechos humanos y contribuya al desarrollo social.

6. CONSIDERACIONES PARA EL FUTURO

- El desarrollo de la industria de biocombustibles debe basarse en la sostenibilidad.
- Es necesario un esfuerzo conjunto de todos los actores involucrados para asegurar que la producción de biocombustibles sea responsable y beneficiosa para todos.
- La investigación e innovación son claves para desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles.

7. RESUMEN FINAL

Los biocombustibles tienen un gran potencial para contribuir a la sostenibilidad energética, pero es crucial asegurar que se produzcan de manera responsable y sostenible. Se requiere un enfoque integral que considere los aspectos ambientales, sociales y económicos.

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento al **Profesor Jesús Casanova Kindelán, Catedrático de Motores Térmicos**. Su invaluable disposición a ayudar en cualquier momento durante el desarrollo de esta investigación fue fundamental para su éxito. Sus consejos, basados en su amplia experiencia y conocimiento, me guiaron y me permitieron superar los desafíos que se presentaron.

Asimismo, quiero agradecer a la **Investigadora de la UPM Blanca del Valle Arenas Ramírez del departamento de ingeniería mecánica**. Su ayuda y simpatía fueron de gran importancia para el avance de la investigación. Su

colaboración y apoyo me brindaron la motivación y el impulso necesarios para seguir adelante.

También quiero agradecer a **Francisco Aparicio Izquierdo** por su invaluable apoyo y colaboración. Su experiencia y conocimiento fueron fundamentales para el desarrollo de la investigación.

De igual manera, quiero agradecer a las **asociaciones colaboradoras**: ASEPA, INSIA, REPSOL, la UPM y la ETSI Industriales. Su participación y apoyo fueron esenciales para el éxito del proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a los **miembros del comité ejecutivo** que han participado para llevar a cabo el evento InnovAuto en este año 2024. Su dedicación, esfuerzo y trabajo en equipo hicieron posible la realización de este evento tan importante.

Sin el apoyo y la colaboración de todas estas personas, este proyecto no habría sido posible. A todos ellos, les doy las gracias de todo corazón.

9. REFERENCIAS

- [1] Carbón Neutral Plus. (2023). *Biocombustibles: Tipos, materias primas y tecnologías de producción*. <https://www.carbonneutralplus.com/que-son-los-biocombustibles/>
- [2] Repsol. (2023). *Biocombustibles*. <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml>
- [3] Gave – Gestión de Aceites Vegetales. (2023). *Biocombustibles de segunda generación*. <https://www.gave.es/biocombustibles-de-primera-segunda-y-tercera-generacion/>
- [4] A. Fernández Muerza. (2023). *Biocombustibles de tercera generación*. <https://www.consumer.es/medio-ambiente/biocombustibles-de-tercera-generacion.html>
- [5] RSB. (2023). *Mesa Redonda sobre Biocombustibles Sostenibles (RSB)*. <https://rsb.org/>
- [6] Bon sucro. (2023). *Bonsucro*. <https://bonsucro.com/>
- [7] European Union. (2023). *Directiva Europea sobre Energías Renovables II (RED II)*. <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- [8] Agencia Internacional de la Energía (AIE). <https://www.iea.org/reports/biofuels>
- [9] EUROSTAT. <https://ec.europa.eu/eurostat>

[10] OECD-FAO *Agricultural Outlook 2021-2030*.
<https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en/full-report/component-13.html#chapter-d1e22061

[11] The Digest. *The Biofuels Digest*. <https://www.biofuelsdigest.com/>

[12] RFA: *Renewable Fuels Association*. <https://www.rfa.org/>

Otras referencias:

[13] Casanova Kindelán, J. (2023). *Motores Térmicos*. <https://www.upm.es/>

[14] Arenas Ramírez, B. del V. (2023). *Ingeniería Mecánica*.
<https://www.upm.es/>

[15] Aparicio Izquierdo, F. (2023). *InnovAuto*. <https://www.linkedin.com/login>

[16] ASEPA. <https://www.youtube.com/watch?v=v8KkwHV5g-k>

[17] INSIA. <https://insia-upm.es>

[18] UPM. <https://www.upm.es>

[19] ETSI Industriales. <https://www.industriales.upm.es/>

2. Tecnologías y experiencias de instalaciones de captura de CO₂ de la atmósfera

Lucas San José Alarcón

ABSTRACT

Direct Air Capture (DAC) has emerged as a crucial technology in climate change mitigation. This study provides mainly an overview of L-DAC and S-DAC technologies, highlighting their role in reducing atmospheric CO₂. Operational and developing facilities worldwide are reviewed, emphasizing landmark projects that illustrate the viability and scalability of DAC. Additionally, the potential of utilizing captured CO₂ in the production of e-fuels is analysed, with significant large-scale examples in the development phase. This analysis offers a comprehensive view of DAC systems, their status, and their transformative potential in transitioning to a low carbon economy.

Keywords: DAC, e-fuels, Carbon capture, technologies, experiences

RESUMEN

La Captura Directa de Aire (DAC), también conocida como *Direct Air Capture*, ha emergido como una tecnología crucial en la mitigación del cambio climático. Este estudio presenta fundamentalmente una panorámica de las tecnologías L-DAC y S-DAC, destacando su papel en la reducción del CO₂ de la atmósfera. Se revisan las instalaciones en operación y en desarrollo a nivel mundial, subrayando proyectos emblemáticos que ilustran la viabilidad y escalabilidad de la DAC. Además, se analiza el potencial de utilizar el CO₂ capturado, en la producción de electrocombustibles, también conocidos como *e-fuels*, con ejemplos significativos a gran escala en fase de desarrollo. Este análisis proporciona una visión integral de los sistemas DAC, su estado actual y su potencial transformador en la transición hacia una economía baja en carbono.

Palabras clave: DAC, electrocombustibles, Captura de carbono, tecnologías, experiencias.

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera en la actualidad (en 2024 ~420–425 ppm en volumen). Otros como el metano y el óxido nitroso tienen mayor potencia de calentamiento global, pero su concentración atmosférica es considerablemente menor (McCarthy et al., 2001 [13]; Altamash et al., 2020 [1]). Además, el CO₂ es un gas que no condensa en la atmósfera y que puede permanecer en ella durante milenios, mientras que el CH₄ y N₂O, 12 y 114 años respectivamente (Solomon et al., 2007 [18]). En los últimos 100 años, el ser humano ha contribuido al aumento de la concentración de CO₂, por medio de la deforestación y del consumo de combustibles fósiles. Como consecuencia, la temperatura media global ha aumentado aproximadamente 1 °C en ese periodo (Sodiq et al., 2023 [17]).

Debido a que la literatura advierte sobre los daños que pueden ocurrir si se superase un aumento de 2 °C (Hausfather, 2015 [9]), actualmente se apuesta por algunos métodos para enfrentar el cambio climático: la adaptación, geoingeniería, mitigación y gestión industrial del carbono (ICM¹). Como resultado, este trabajo se centra en el ICM, el cual se ocupa de gestionar el consumo persistente de combustibles fósiles, al mismo tiempo que captura el CO₂ para su almacenamiento o utilización. Particularmente, en este trabajo se comenta la tecnología de captura directa de CO₂ debido a sus claras ventajas a la hora de reducir o mantener la concentración de CO₂ de la atmósfera.

La captura directa de CO₂ de la atmósfera es uno de los métodos utilizados para capturar el dióxido de carbono. Comúnmente se le conoce por las siglas DAC, del inglés: *Direct Air Capture* y es una tecnología de captura que puede emplearse tanto en estrategias CCU como CDR. Principalmente, consiste en la extracción de CO₂ directamente del aire del ambiente, permitiéndole capturar carbono desde cualquier lugar. Esto es una ventaja con respecto a la mayoría de los métodos de capturas de carbono, que generalmente, capturan el CO₂ en un punto de emisión de gases (fuentes puntuales), como, por ejemplo, en plantas industriales. El esquema general del proceso se muestra en la Figura 1.

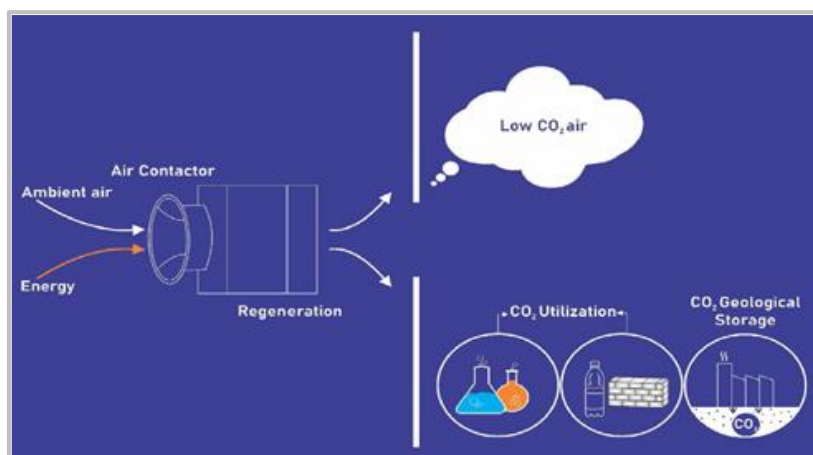


Figura 1. Representación esquemática de la captura directa de CO₂ del aire, su utilización y almacenamiento (Sandalow et al., 2018 [16])

¹ Industrial Carbon Management, ICM

En la literatura, se realiza una especie de mapa conceptual para clasificar las diferentes tecnologías de captura de carbono según el origen y el uso dado al CO₂. En primer lugar, los métodos de captura y almacenamiento de carbono (CCS²) consisten en capturar el CO₂ de fuentes puntuales y almacenarlo en formaciones geológicas profundas o en forma de minerales. La tecnología DAC, tratada en este trabajo se clasifica como CCU, dado que el objetivo de esta publicación es capturar el dióxido de carbono del aire para producir electrocombustibles (*e-fuels*) aplicables en el sector del transporte pesado (Apartado 5). Además, los métodos de captura y utilización de carbono (CCU³) consisten en capturar CO₂ de fuentes puntuales o de la atmósfera directamente, y utilizarlo en otras aplicaciones mediante algunas transformaciones. Por último, las tecnologías de extracción de dióxido de carbono (CDR⁴) consisten en capturar el CO₂ directamente de la atmósfera y almacenarlo.

Se ha comentado que el sistema DAC tiene grandes ventajas, como la independencia del origen de la emisión de CO₂ y que el sistema de captura se pueda estacionar en cualquier lugar, especialmente en localizaciones donde el precio de la energía sea bajo o donde la energía renovable sea abundante. Sin embargo, esta tecnología es la más cara de los diferentes métodos de captura de carbono (Budinis, 2022 [4]). El CO₂ está mucho más diluido en la atmósfera, que en las emisiones de gas de una central industrial. Como consecuencia, se requiere más energía y, por tanto, más coste. Aun así, es uno de los métodos con mayor potencial dadas las oportunidades que tiene, como la producción de electrocombustibles mencionados anteriormente, que reduciría el coste y acercaría los sistemas DAC a un mercado competente.

2. MÉTODOS Y TECNOLOGÍAS

Existen una variedad de métodos y técnicas para capturar y separar el CO₂ ilustradas en la Figura 2, pero este trabajo se centrará en dos: la absorción y la adsorción, dado que son las técnicas utilizadas particularmente en sistemas DAC.

Ambos métodos tratan de generar un contacto entre un sorbente y el aire de la atmósfera. El sorbente absorbe (si el sorbente es líquido) o adsorbe (si el sorbente es sólido) el CO₂ contenido en el flujo de aire que entra al sistema. Posteriormente a la captura del dióxido de carbono por el sorbente, ocurre la regeneración de este por medio de una separación o liberación del CO₂, con el objetivo de reutilizarlo para capturar más CO₂. Seguidamente, el dióxido de carbono liberado en una concentración alta será almacenado o utilizado en alguna aplicación específica (Figura 1).

Para que ocurra la captura se deben cumplir una serie de condiciones dependientes del ambiente y de las características del sorbente seleccionado. En primer lugar, es necesario realizar la captura en condiciones ambientales, dado que presurizar, calentar o enfriar tales cantidades de aire no es viable económica ni medioambientalmente, debido a la segunda condición necesaria. Ésta, consiste en consumir energía de fuentes de bajas emisiones de carbono, por tanto, cambiar las condiciones ambientales supondría una necesidad de grandes cantidades de energía. De esta forma, se podría alcanzar una emisión negativa de CO₂ a la atmósfera, ya que

² Carbon Capture and Storage, CCS

³ Carbon Capture and Utilization, CCU

⁴ Carbon Dioxide Removal, CDR

se capturaría más dióxido de carbono del que se emitiría, convirtiendo el balance en negativo. Cabe mencionar, que ese balance depende del uso posterior que se le dé a ese dióxido de carbono capturado, dado que solo se daría en el caso de almacenarlo (CDR).

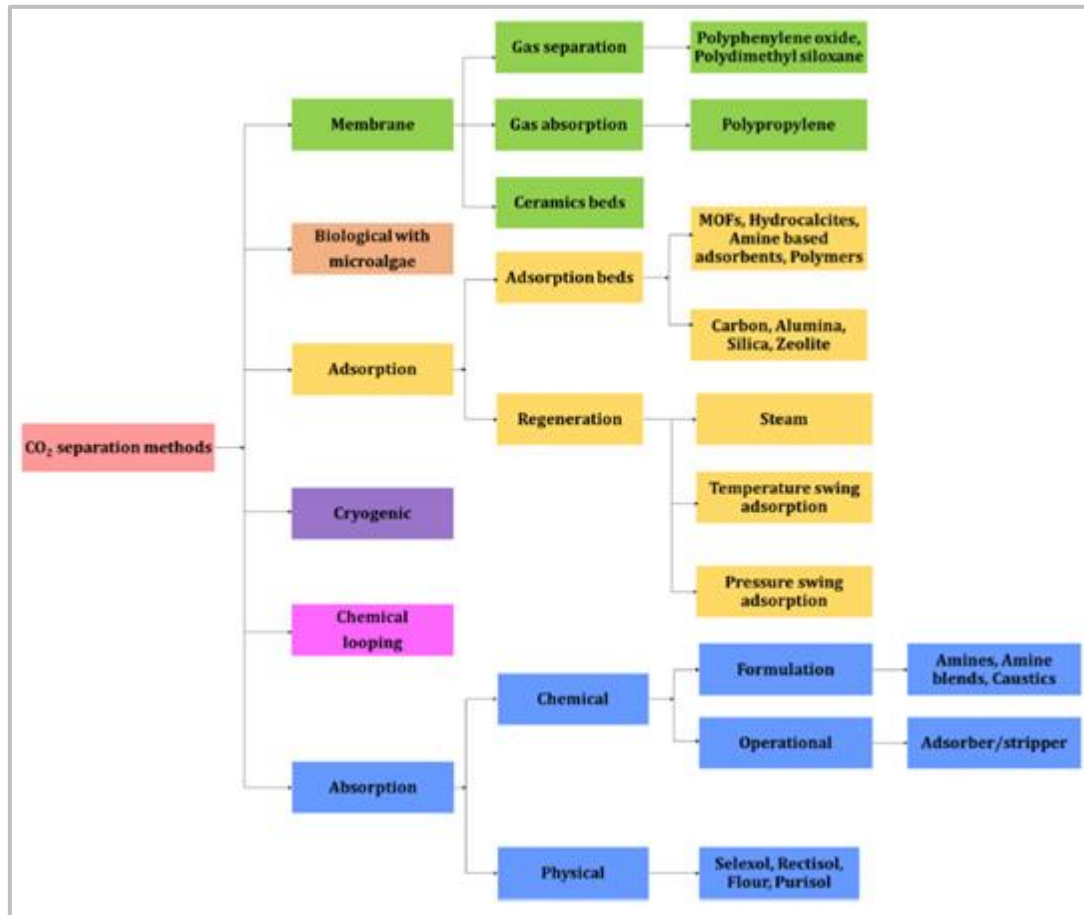


Figura 2. Tecnologías de captura y separación del CO₂ (Dubei & Akhilesh, 2022 [7])

Por otro lado, la elección del sorbente es crucial para que la captura y la regeneración se den de forma óptima. Las características ideales para que un sorbente capture CO₂ de la atmósfera son las siguientes (Sodiq, 2023 [17]):

- Alta selectividad
- Alta capacidad
- Propiedades cinéticas rápidas
- Estabilidad térmica y química
- Propiedades mecánicas (sorbente líquido)
- Facilidad de carga (sorbente sólido)
- Resistencia al fallo

- Facilidad de regeneración
- Bajo coste

Como suele ocurrir en ciencia, no existe tal sorbente ideal que cumpla con dichas propiedades. Sin embargo, en las últimas dos décadas se han realizado investigaciones que aportan algunos compuestos líquidos y sólidos aplicables a los sistemas DAC, como, por ejemplo: las aminas sólidas, las estructuras de metal orgánico (MOFs⁵), compuestos alcalinos y alcalinotérreos básicos ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH y NaOH)⁶ entre otros (Sodiq, 2023 [17]). Como se ha podido observar, los compuestos mencionados son básicos porque la misión es capturar el dióxido de carbono, un gas ácido.

Como se ha mencionado anteriormente, existen dos métodos o tecnologías predominantes en los sistemas DAC: los procesos de absorción, para los sorbentes líquidos y los procesos de adsorción para los sorbentes sólidos. A continuación, se pasa a describir cada uno de los métodos.

2.1. Proceso de absorción o L-DAC

Al proceso de absorción de un sorbente líquido se le suele denominar L-DAC⁷, dado que la captura se da gracias a una solución básica acuosa como el hidróxido de sodio o potasio, mencionados en el apartado anterior. Estos procesos funcionan a temperaturas altas, en el rango de 300°C - 900°C (Yagmur et al., 2024 [19]). El origen de este método para reducir la cantidad de dióxido de carbono data de 1999 (Lackner et al., 1999 [12]).

La empresa Carbon Engineering muestra un esquema de una configuración actual de una instalación L-DAC (Figura 3a). En ese esquema, el dióxido de carbono es absorbido selectivamente del aire por una solución acuosa de KOH en el contactor de aire (*air contactor*) para generar unos precipitados de carbonatos (*pellets*)⁸, que son transportados a un quemador, permitiendo la obtención de un flujo de CO_2 (*pure CO₂*) puro. Para que el ciclo continúe, los quemados de los carbonatos pasan a un proceso de hidratación (*slaker*), un tratamiento químico exotérmico entre una cal y el agua. De tal forma que pueda reaccionar en el pellet reactor para obtener la solución acuosa del sorbente líquido utilizado al principio. Éste volverá a entrar en contacto con el aire (*air contactor*) para comenzar el ciclo de nuevo.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de los procesos químicos que ocurren en el sistema DAC-L utilizando hidróxido de potasio como sorbente líquido (KOH). Resumidamente, el KOH entra en contacto con el aire, reaccionando con el CO_2 , para obtener una disolución de carbonato de potasio (K_2CO_3). Esta disolución se mezcla con un precipitado de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) obteniendo carbonato de calcio (CaCO_3) y KOH . El KOH se recircula en el primer ciclo, mientras que el carbonato de calcio comienza el siguiente, donde se quema para obtener CO_2 puro y una cal sólida

⁵ Metal-organic framework, MOF

⁶ Hidróxido de calcio, hidróxido de potasio e hidróxido de sodio

⁷ Liquid-Direct Air Capture, Captura Directa del Aire con un compuesto líquido

⁸ Bolitas de algún compuesto, en este caso de un carbonato

(CaO). El dióxido de carbono se ha conseguido separar, mientras que la cal se hidrata con agua para dar Ca(OH)₂, necesario para completar el primer ciclo y volver a obtener el sorbente KOH mencionado al principio.

Es importante remarcar que reutilizar el Ca(OH)₂ y KOH es imprescindible dado que son sustancias que no se encuentran en la naturaleza. Otro factor relevante a la hora de la eficiencia de este tipo de instalaciones es el tamaño del sistema contacto de aire y la superficie necesaria para procesar una cantidad de aire determinada en un tiempo dado (Yagmur et al., 2024 [19]).

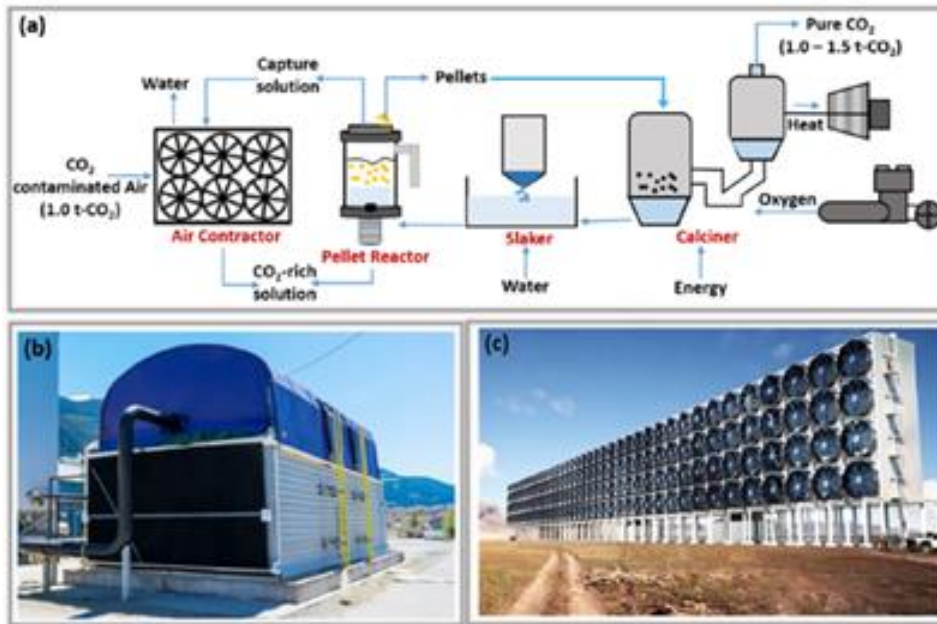


Figura 3. (a) Diagrama esquemático de un sistema DAC-L, (b) planta piloto del sistema DAC-L, (c) una foto de la planta comercial a escala comercial diseñada para el proceso DAC-L continuo por Carbon Engineering Inc. (Yagmur et al., 2024 [19])

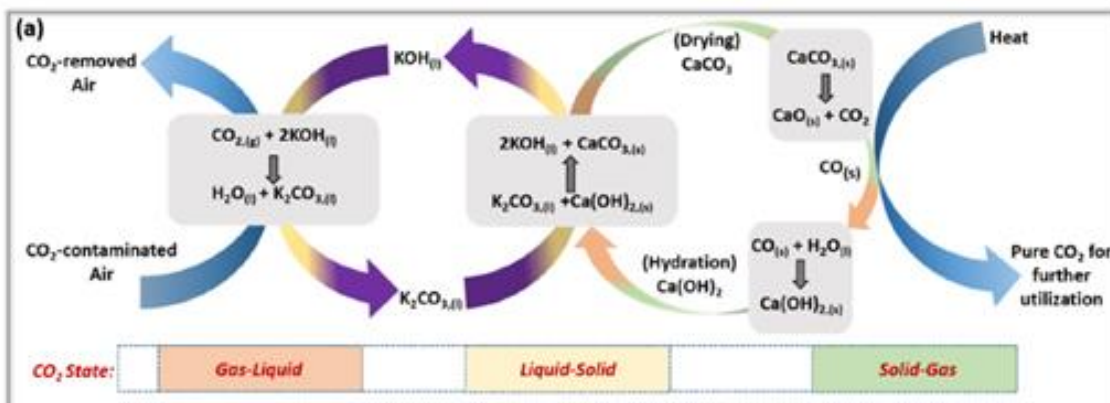


Figura 4. Ilustración esquemática de las reacciones químicas en un proceso DAC-L usando KOH como sorbente líquido (Zeman & Lackner, 2004 [20])

En la Figura 3b-c se representa un proyecto piloto de un sistema DAC-L de la empresa ya mencionada *Carbon Engineering*, del cual se recogen ciertos datos que estiman que un sistema DAC-L escalado a la realidad podría funcionar a un nivel comercial capturando 1 Mt de CO₂ anualmente. Este valor se obtiene considerando la cantidad de dióxido de carbono que se captura con el sistema L-DAC (1,5 Mt/año) menos la cantidad de CO₂ que se emite a la atmósfera debido al consumo de energía por medio de la combustión de gas natural, necesario para que el sistema funcione (0,5 Mt/año). Particularmente, según dicha empresa, la energía necesaria para capturar 1 t de CO₂ es de 8,8 GJ de gas natural o 5,25 GJ de gas y 366 kWh de electricidad. Además, según evaluaciones económicas el coste de la captura de una tonelada de CO₂ oscila entre 94 y 232\$ (para sistemas DAC-L) (Keith et al., 2018 [11]). Sin embargo, es necesario realizar más estudios experimentales para lograr la viabilidad de esta tecnología en el mercado, ya que la literatura actual muestra muchos resultados teóricos en comparación con resultados experimentales (Yagmur et al., 2024 [19]).

Por otro lado, para facilitar la viabilidad de este sistema se investigan distintos sorbentes que puedan mejorar el proceso de alguna manera. Además de los hidróxidos alcalinos como el ya mencionado KOH, las aminas primarias no restringidas en medios acuosos han demostrado eficacia como sorbentes en sistemas DAC-L. Además, pueden llegar a ser más eficientes energéticamente ya que en el proceso de regeneración no es necesario temperaturas tan altas como en el caso del KOH. Una comparación entre el NaOH y las aminas se ilustra en la Figura 5, donde se muestran sus eficacias de captura de CO₂. Los resultados revelan que muchas de las aminas tienen el mismo valor que las disoluciones de NaOH: 2-(butilamino)-etanol (BUEA), 2-(2-aminoetoxi)-etanol (DGA), metildietanolamina (MEA), 2-(etilamino)-etanol (EMEA), 2-(metilamino)-etanol (MMEA), 1-amino-2-propanol (1A2P) y 2-amino-1-butanol (2A1B).

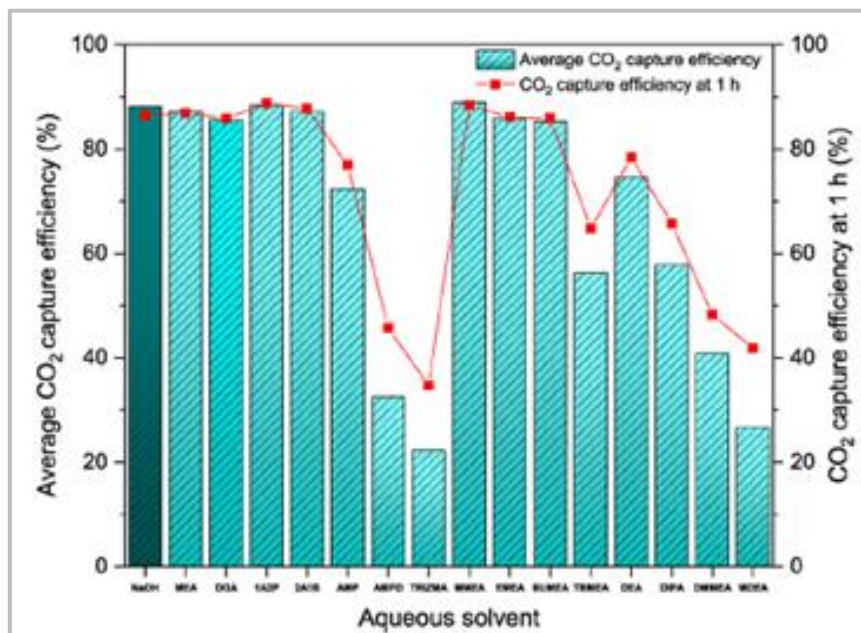


Figura 5. Comparación entre el NaOH y las aminas primarias de la eficiencia media de captura de CO₂ y la eficiencia de captura en una 1 hora (Barzagli et al., 2020 [2])

Sin embargo, la tecnología L-DAC tiene una barrera energética que la hace peor opción y menos atractiva que la tecnología S-DAC dada la necesidad de altas temperaturas en el proceso de regeneración. Sin embargo, las tecnologías S-DAC pueden utilizar el calor residual de las instalaciones industriales, suponiendo una ventaja económica frente a los sistemas L-DAC (Yagmur et al., 2024 [19]).

2.2. Proceso de adsorción o S-DAC

Al sistema de adsorción de un sorbente sólido se le conoce como S-DAC, Solid Direct Air Capture. La mayoría de los sistemas S-DAC consisten en uno o varios módulos con unos filtros hechos de un material sólido que adsorbe el CO₂. Resumidamente, el proceso consta de dos fases: una, de captura del dióxido de carbono y otra de regeneración del sorbente. Un ejemplo del esquema del proceso se ilustra en la Figura 6.

En la primera fase, el CO₂ procedente del aire de la atmósfera es capturado por el sorbente sólido (filtro) en el interior del módulo gracias a un enlace químico entre ellos a temperatura ambiente. Por otro lado, el aire empobrecido de CO₂ sale del módulo. Una vez, que el sorbente sólido sature de CO₂, comienza la segunda fase. A continuación, la válvula de entrada se cierra, los ventiladores se apagan, y si es necesario se crea vacío. Después, el sistema se calienta a una temperatura de unos 100 °C para completar la regeneración, según el material sorbente utilizado. Este calentamiento provoca la liberación de CO₂, que será recogido para posteriormente utilizarlo en otras aplicaciones o almacenarlo.

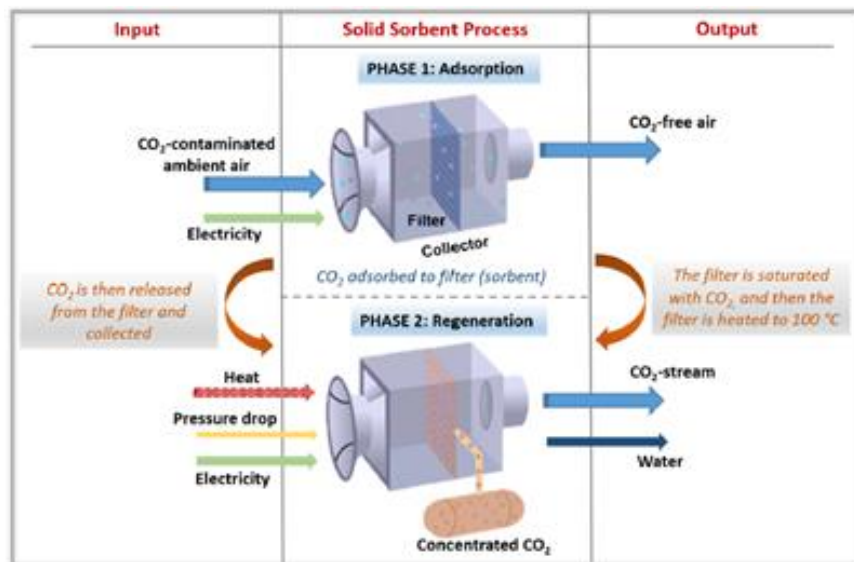


Figura 6. Diagrama esquemático de un sistema S-DAC (Yagmur et al., 2024 [19])

Actualmente, los sorbentes utilizados comercialmente son los anteriormente mencionados MOFs y las aminas sólidas. La empresa Climeworks utiliza aminas sólidas condicionadas para capturar CO₂ en condiciones ambientales y para que la temperatura de regeneración del sorbente sea entre 80 y 100 °C. Esta temperatura de regeneración en comparación con las de los sistemas DAC basados en sorbente

líquidos es muy grande, haciendo que sea potencialmente más competitiva desde el punto de vista energético.

Fundamentalmente, existen dos tipos de adsorción: química y física. Además, se pueden clasificar según si el sorbente es un compuesto orgánico o inorgánico.

2.3. Comparativa

A continuación, se realiza una comparativa de características técnicas, ambientales y económicas de ambas tecnologías con el objetivo de entender sus dimensiones, capacidades y posibilidades de mejora (Tabla 1)

Tabla 1. Comparativa de las características de las tecnologías S-DAC y L-DAC.
(Bunidis, 2022 [4])

Característica	S-DAC	L-DAC
Sorbente	Adsorbente sólido	Absorbente líquido
Consumo de energía específica (GJ/tCO ₂)	7,2-9,5	5,5-8,8
Consumo de calor (%)	75-80	80-100
Consumo de electricidad (%)	20 - 25	0 - 20
Temperatura en la regeneración (°C)	80 - 100	900
Presión en la regeneración	Vacío	Ambiente
Capacidad de captura	Modular (e.g 50tCO ₂ /año por unidad)	Gran escala (e.g 0,5MtCO ₂ /año)
Consumo neto de agua (tH ₂ O/tCO ₂)	-2 - 0	0 - 50
Terreno requerido (km ² /MtCO ₂)	1,2 - 1,7	0,4
Emisiones del ciclo de vida (tCO ₂ emitido/tCO ₂ capturado)	0,03 - 0,91	0,1 - 0,4
Levelised cost of capture (USD/tCO ₂)	Hasta 540	Hasta 340

A primera vista, se aprecia el mayor coste de la tecnología S-DAC debido principalmente al mayor consumo de energía específica y a la cantidad de terreno requerido, así como otros aspectos como la escalabilidad, el mantenimiento. También

el precio de la energía térmica y el porcentaje de consumo de calor puede tener importancia dado que el calor emitido por otros procesos se puede aprovechar. Con estas características se pueden diferenciar ventajas y desventajas de ambos métodos (Tabla 2).

Tabla 2. *Ventajas y desventajas de las tecnologías DAC. (Bunidis, 2022 [4])*

	S-DAC	L-DAC
Ventajas	Requiere menos capital Posible producción neta de agua Estructura modular escalable Más novedoso, con oportunidad de reducir coste	Menor consumo intensivo de energía Captura a gran escala Depende de disolventes comerciales Tecnología adaptada ya existente Proceso continuo
Desventajas	Mayor consumo intensivo de energía Mantenimiento manual en el recambio del sorbente Proceso discontinuo	Requiere más capital La regeneración del solvente depende de la combustión de gas natural

Cabe resaltar, que los sistemas S-DAC, aunque requieran mayor consumo, necesitan menos capital, indicando que, aunque el LCOC (*Levelised Cost Of Capture*) sea mayor el coste final puede ser menor. Sin embargo, no es un tema estático, dado que ambas tecnologías tienen un alto potencial de reducción de costos según el enfoque. Por ejemplo, en las S-DAC se pueden implantar rápido varios módulos reduciendo el coste a corto plazo, mientras que las plantas L-DAC pueden generar mayores eficiencias de volumen, reduciendo los costes a largo plazo. Por último, el nivel de madurez tecnológica (TRL⁹) de los sistemas DAC-S (7) es mayor que los DAC-L (6) según la IEA.

3. INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA DAC

Los avances en las tecnologías de captura directa de la atmósfera se centran en mejorar la eficiencia del sistema por medio de cambios en el diseño de los contactores de aire y en las técnicas de regeneración de los sorbentes (Sodiq et al., 2023 [17]). A continuación, se muestran algunos de los avances más significativos.

3.1. Diseño de contactores de aire

La captura de CO₂ depende de la superficie expuesta por unidad de volumen del contactor, es decir que, si esta superficie es muy alta, se puede utilizar un sorbente

⁹ *Technology Readiness Level, TRL*

con menor capacidad de captura para obtener el mismo CO₂ previo. Por otro lado, en todos los sistemas DAC se requiere de ventiladores eléctricos, con el objetivo de superar la caída de presión que ocurre en los contactores de aire. Por tanto, la caída de presión por unidad de superficie del contactor es un parámetro claro que mejorar.

En el caso de los sistemas L-DAC se encuentran una idea que utiliza una membrana liquido-gas como contactor (Favre & Svendsen, 2012 [8]). Por otro lado, en los sistemas S-DAC hay más diseños diferentes: contactores de lecho fijo, de lecho fluidizado, de lecho móvil, de fibra y de monolito. Sin embargo, los diseños más prometedores son los de lecho fijo y móvil (Sodiq et al., 2023 [17]).

3.2. Técnicas de regeneración de sorbentes

La fase de regeneración trabaja variando la temperatura o la presión, por lo que requiere de un consumo energético. El objetivo de realizar avances en dicha técnica ayudará a minimizar dicho consumo para optimizar el gasto energético. Abajo, se describen las opciones encontradas en la literatura descrita por Sodiq et al., 2023 [17].

- **Adsorción por oscilación de temperatura y, de temperatura y vacío (S-DAC):** la adsorción por oscilación de temperatura (TSA¹⁰) es la más utilizada hoy en día para los sistemas S-DAC de aminas sólidas. Su desventaja es la oxidación de las aminas debido al CO₂ diluido y los 100 °C. La opción de mejorar esta técnica es introducir un gas inerte en vez de aire, aunque supondría un problema de precio al escalarlo. Utilizar la combinación (TVSA¹¹) para la liberación del CO₂ puede ser una buena opción para producir una corriente de CO₂ de mayor pureza.
- **Proceso Kraft con calcio básico (L-DAC):** el proceso Kraft es popularmente conocido por recoger la celulosa de la madera en la fabricación de papel. Por otro parte, este proceso también se utiliza en los sistemas L-DAC de sorbentes alcalinos, que es el descrito en el apartado 2.1, especialmente en la Figura 4. Para mejorar este proceso se han desarrollado otros ciclos que demandan menos energía como, un ciclo de regeneración de óxido de titanato, un método electroquímico para regenerar el LiOH y un método que utiliza una célula electroquímica con hidrógeno que demuestra la regeneración del sorbente y la liberación del CO₂ con alta pureza y parecido consumo de energía que los anteriores.
- **Adsorción por oscilación de humedad (S-DAC):** También conocido como MSA, es una técnica que consiste en el recubrimiento de un sólido con una resina. Este nuevo sorbente puede capturar CO₂ del aire en seco y luego liberarlo hidratado. Su ventaja es la no necesidad de aumentar la temperatura ni de bajar la presión como ocurre con las técnicas TSA y PSA¹². Sus desventajas, son la captura de CO₂ en ambientes húmedos y su capacidad de captura, aunque si el uso de ese CO₂ es en aplicaciones, donde se requiere de concentración baja de CO₂ podría ser suficiente, como en los invernaderos agrícolas.

¹⁰ Temperature Swing Adsorption, TSA

¹¹ Temperature-Vacuum Swing Adsorption, TVSA

¹² Pressure Swing Adsorption, PSA

- **Cristalización (L-DAC):** esta tecnología permite que la fase de liberación del CO₂ capturado sea barato debido a sus aportes mínimos de compuestos químicos y de energía. Por ejemplo, un sorbente líquido de guanidina, conocido como PyBIG cuando contacta con el CO₂ forma una sal cristalina carbonatada, la cual es poco soluble, que lo hace perfecto para filtrar el cristal. Después se calienta (80-120 °C), para liberar el CO₂ puro.
- **La adsorción por electro oscilación:** conocido como ESA-DAC se trata de una celda electroquímica donde un electrodo sólido adsorbe CO₂ cuando está cargado negativamente y lo libera al aplicarse una carga positiva.

Además de las anteriores mejoras, existen otras a mencionar como el uso extendido actualmente de zeolitas como sorbente sólido, dada su porosidad. Hay una planta DAC-S operativa en Noruega. También cabe mencionar el método DAC pasivo, el cual trata de acelerar el proceso natural de transformar el hidróxido de calcio y el CO₂ en piedra caliza. Este proceso se está investigando por la empresa norteamericana Heirloom. Por último, se podrían combinar los sistemas DAC con sistemas de ventilación existentes como en los edificios a la hora de optimizar la compresión de grandes volúmenes de aire.

4. EXPERIENCIAS DE INSTALACIONES DAC

Actualmente, se han puesto en marcha 27 plantas DAC entre Europa, Norteamérica, Japón y Oriente Medio. La gran mayoría son plantas de pequeña escala con algunos acuerdos comerciales para vender o almacenar el CO₂. A continuación, se describirá la situación actual de algunas de estas plantas, las políticas de los países más involucrados en la apuesta de sistemas DAC y proyectos futuros de gran escala.

4.1. Políticas y financiación DAC

En el presente, Estados Unidos lidera la carrera en el apoyo político a los sistemas DAC, aunque otros países están logrando avances notables como menciona Bunidis, 2024 [5]:

- **Estados Unidos** anunció en agosto de 2023 la financiación de 1,2 mil millones \$ para el avance en el desarrollo de dos instalaciones DAC a gran escala: el proyecto Cypress en Lousiana y un proyecto DAC en el centro de operaciones DAC del sur de Texas. Juntos capturarían 2 Mt/año de CO₂.
- **La Comisión Europea** apuesta por la captura de carbono, queriendo almacenar 50 Mt/año de CO₂ para 2030, incluyendo el DAC como uno de los métodos de captura. Por otro lado, en febrero de 2024, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea lanzaron un acuerdo provisional sobre el Marco de Certificación de Eliminación de Carbono, siendo el primer marco voluntario a nivel de la UE para certificar la eliminación de carbono.
- **En el Reino Unido** se presentó los presupuestos de 2023, que incluía una financiación de 20 mil millones de libras esterlinas para aplicaciones de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS).

- **En Japón** se realizó un informe en 2023 sobre CCUS, con el objetivo de capturar entre 6 y 12 Mt/año de CO₂ para 2030.
- **En Canadá** desde 2022 hasta 2030 el 60% de las tasas de crédito fiscal para proyectos CCUS se invertirán en equipos de captura directa de aire (DAC).

4.2. Instalaciones DAC internacionales en operación y desarrollo

Las tres plantas que más capturan (>1000 t/año) son: Orca de la compañía *Climeworks* en Islandia, otra en Colorado en la sede de la compañía *Global Thermostat* y la primera instalación comercial a gran escala de Estados Unidos, en California, por la compañía *Heirloom*.

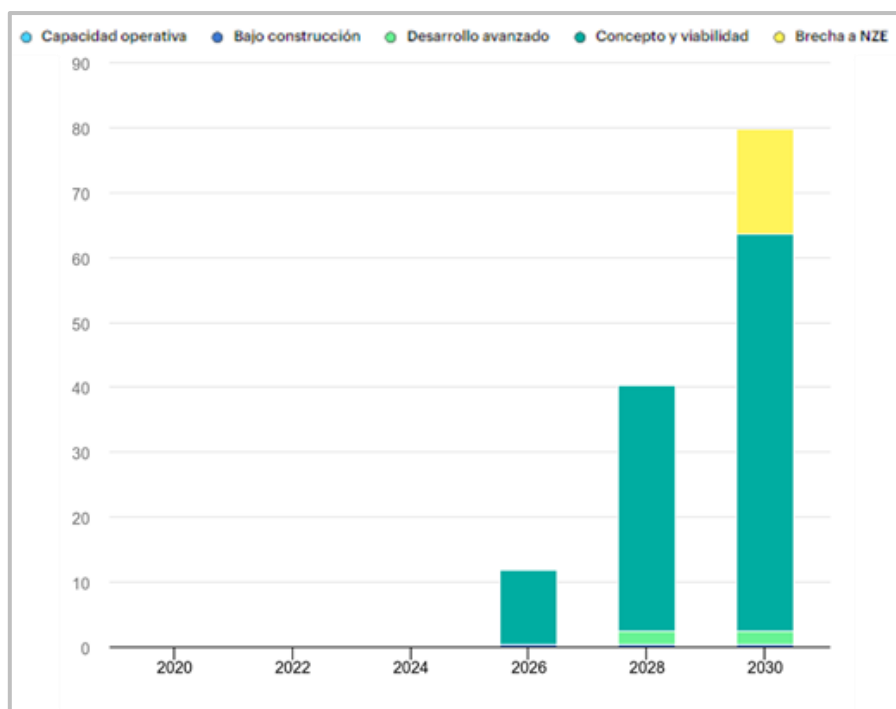


Figura 7. Captura de CO₂ en Mt por sistemas DAC planeados y nivel requerido por Escenario Emisiones Netas Cero para 2050 (NZE) (Bunidis, 2024 [5])

En la Figura 7 se representa una previsión de la capacidad de captura de CO₂ para los próximos años hasta 2030, considerando los proyectos en desarrollo y sus planes de operación. Se puede concluir que para el año 2030 aumentarán los desarrollos en muchos proyectos DAC, pero sin llegar a operar a niveles de captura de Mt/año. Cabe destacar, el nivel requerido del Escenario de emisiones netas cero (NZE) de alcanzar una capacidad de captura de 80 Mt/año en 2030. Éste, es un escenario normativo que guía las economías avanzadas a alcanzar las cero emisiones de carbono, con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C en línea con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Se puede apreciar en la figura que se está muy lejos del camino propuesto por dicha normativa en la operación de captura de CO₂ de la atmósfera.

Al menos 130 instalaciones DAC se encuentran en diferentes etapas de desarrollo. Algunos de estos se encuentran en Estados Unidos (*Stratos*, *HIF eFuels Project* en Texas y Chile, *Cypress Project* en Louisiana, y *Bison Project* en Wyoming), en Noruega (*Kollsnes DAC Project*) y en Islandia (*Mammoth Project*). Existen otros proyectos de gran escala en Kenia y en los Emiratos Árabes Unidos, pero están en una etapa de desarrollo muy temprana. De estas 130 instalaciones solo 15 se encuentran en una etapa de desarrollo avanzado o en construcción. Estas y muchas otras plantas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Algunas instalaciones DAC en el mundo (Clean Air Task Force, CATK, 2018 [6])

Instalación	Ubicación	Capacidad [t CO ₂ /año]	Entidades	Estado	CCUS
Orca	Islandia	4.000	Climeworks, Carbfix, ON Power	Operacional	CCS
Heirloom DAC Facility	Estados Unidos	1.000	Heirloom, CarbonCure	Operacional	CCS
Sede de Global Thermostat	Estados Unidos	1.000	Global Thermostat	Operacional	CCUS
Project Bison	Estados Unidos	5.000.000	Carbon Capture Inc., Frontier Carbon Solutions	En desarrollo	CCS
Project Cypress	Estados Unidos	1.000.000	Battelle, Climeworks, Heirloom	En desarrollo	CCS
South Texas DAC Hub	Estados Unidos	1.000.000	1PointFive	En desarrollo	CCS
Stratos DAC Project	Estados Unidos	500.000	Carbon Engineering, Oxy, 1PointFive	En desarrollo	CCU
Sizewell C DAC	Reino Unido	1.500.000	Sizewell C et al.	En desarrollo	Desc.
Solar DAC	Omán	Piloto	44.01 Inc., Climeworks	En desarrollo	CCS

4.3. Instalaciones DAC en España

En España la captura del CO₂ no está contemplada actualmente. Las estrategias públicas de reducción de emisiones, como las recogidas en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima, o en la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo, no la contemplan (en el caso del PNIEC) o sólo la admiten si se realiza de forma natural (por los llamados sumideros naturales de carbono, esto es, mediante fotosíntesis en bosques o vegetación natural) (Papeles de Energía, 2023 [14]).

Estas posiciones pueden parecer más coherentes con las recogidas en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC, que, si bien plantea que los sumideros naturales tienen un gran potencial y bajo coste, también defiende que, en un contexto de cambio climático en marcha, los sumideros plantean elevados riesgos (por menor tasa de captura, o por incendios que devuelvan el CO₂ capturado a la atmósfera), y por tanto será imprescindible contar con tecnologías de captura si se quieren lograr los objetivos climáticos (Papeles de Energía, 2023 [14]).

En España se pretende minimizar las emisiones de CO₂, dado que capturar el dióxido de carbono puede suponer la continuidad de emisión de gases de efecto invernadero, también conocido como *greenwashing*. Sin embargo, se entiende que las tecnologías de captura tendrán un papel importante con ciertos límites. Actualmente no existe ninguna instalación de captura directa del aire.

Si bien no existen instalaciones DAC, en España hay algunos proyectos de captura de CO₂ de fuentes puntuales como: Proyecto CO₂ *Funnels* en Almería, otro proyecto en la central de Hunosa, en Asturias y el Proyecto del *Hub* de Descarbonización del Puerto de Bilbao con Repsol y Petronor.

5. USO DEL DAC EN EL TRANSPORTE

En este apartado se comentará el uso que puede tener el CO₂ capturado de la atmosfera en el sector del transporte, siendo una de la gran variedad de rutas que puede tener este CO₂ capturado (CCUS). Esta aplicación trata de producir electrocombustibles, comúnmente conocidos como *e-fuels*, los cuales son carburantes líquidos sintéticos, producidos a partir de agua y dióxido de carbono. La electricidad necesaria para su producción debería proceder de fuentes renovables para lograr las emisiones netas cero de carbono tras su uso en el transporte.

Para producir dicho electrocombustible se necesita hidrógeno (H₂) y el ya mencionado CO₂. El H₂ se obtiene tras un proceso de electrólisis de agua y el CO₂ se obtiene por tecnologías de captura, tanto de fuentes puntuales como de la atmósfera (DAC). Posteriormente, se combinan tanto el H₂ como el CO₂ por medio de un proceso de síntesis de *Fischer-Tropsch*, del que se obtiene el electrocombustible, el cual es fácil de almacenar y transportar a refinerías, donde mediante otros procesos generan e-gasolina, e-diésel, e-queroseno y e-gas (Figura 8). Algunas industrias como el transporte pesado de larga distancia y los sectores de aviación son difíciles de electrificar, por lo que podrían utilizar combustibles sintéticos como estos.

Actualmente, hay 15 proyectos a gran escala (alrededor de 100.000 tCO₂/año) de proyectos de captura en fuentes puntuales para la producción de electrocombustibles.

Sin embargo, al utilizar el CO₂ capturado de las emisiones de instalaciones industriales, solo se consigue reducir las emisiones de la instalación de captura y del uso de combustibles fósiles, pero no se logra el objetivo de emisiones cero netas. Para lograr dicho objetivo es primordial utilizar la tecnología protagonista en dicha sección de la publicación, la captura directa del aire (DAC). Por otro lado, aunque no sea el mayor escenario puede servir como una transición temporal hasta que las tecnologías de captura del aire lleguen a gran escala en el futuro. Para ello, es necesario mayores ayudas políticas.

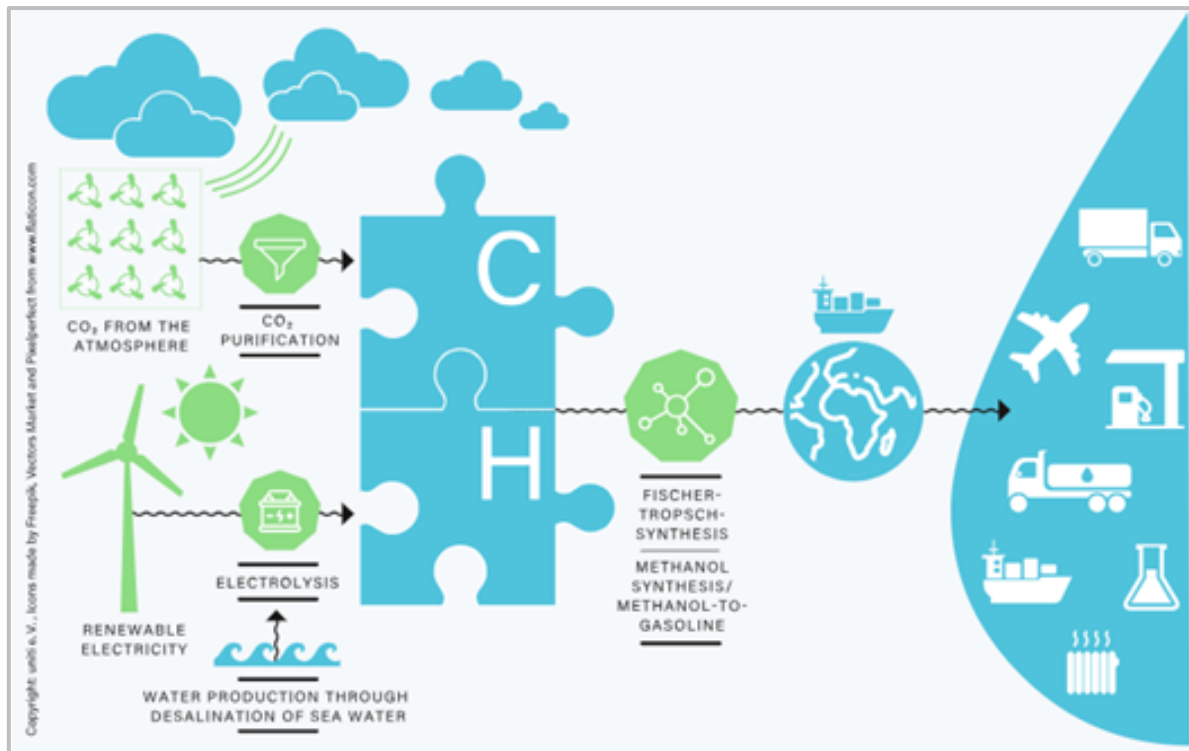


Figura 8. Esquema general del ciclo total de producción de electrocombustibles
(<https://www.efuel-alliance.eu/>)

En cualquier caso, es posible que las instalaciones basadas en combustibles fósiles que inviertan hoy en la captura de CO₂ para la producción de electrocombustibles tengan que evaluar opciones futuras para que ese CO₂ capturado se almacene finalmente de forma permanente. Esto es debido a que el escenario de emisiones netas cero de la IEA, alrededor del 95% del CO₂ total capturado se destina al almacenamiento (CCS) en lugar de a su uso en otras aplicaciones. Concretamente, de los 980 MtCO₂ capturados mediante DAC en 2050, 630 se almacenan de forma permanente, mientras que 350 se destinan a la utilización del CO₂, principalmente para combustibles de aviación).

A pesar de todo, existe algún proyecto DAC que utilizará el CO₂ capturado explícitamente para la producción de electrocombustibles. Por ejemplo, Porsche y HIF Global están estudiando si se puede utilizar el CO₂ capturado por una instalación DAC para producir electrocombustibles en la planta *Haru Oni eFuels* en Punta Arenas, en Chile. Por ello, en 2023 en la cumbre de IAA en Múnich *HIF Global* con Porsche, Volkswagen y *MAN Energy Solutions* anunciaron el desarrollo y la instalación de una

unidad de captura directa de aire (DAC) en la planta *Haru Oni eFuels* (Figura 9). De esta forma, esta planta se convertiría en la primera de producción de electrocombustibles que integra un sistema DAC. Este prototipo filtraría 600 tCO₂/año (HIF Global, 2023 [10]).

Por otro lado, HIF Global y Baker Hughes (BKR) anunciaron un acuerdo para el desarrollo de la unidad DAC, utilizando la tecnología Mosaic DAC de Baker Hughes a escala piloto, permitiendo acelerar el proceso de escalamiento a nivel comercial, tal y como comenta el presidente de HIF Global, César Norton (HIF Global, 2023 [10]): “las tecnologías innovadoras como Mosaic, que permiten una captura de CO₂ eficiente y de bajo costo de la atmósfera, representan el futuro del reciclaje de CO₂. La cooperación con nuestro socio Baker Hughes acelera nuestro plan para capturar 25 millones de toneladas de CO₂ por año y combinarlo con hidrógeno verde para producir 150.000 barriles por día de eFuels y descarbonizar más de 5 millones de vehículos en uso hoy en día y dar así un paso decisivo en la descarbonización del planeta”.

La tecnológica Mosaic Materials adquirida en 2022 por Baker Hughes desarrolla una tecnología de captura S-DAC utilizando los ya mencionados MOF (Metal-Organic Framework) como adsorbente del CO₂ de la atmósfera. Por otro lado, HIF Global está completando los primeros pasos para instalar en el condado de Matagorda, en Texas la primera instalación de electrocombustibles a escala mundial y espera empezar la construcción en 2024. También se planea construir una planta DAC en la misma ubicación siguiendo los mismos pasos que en Chile.



Figura 9. Presentación de HIF Global et al. el proyecto de instalación DAC en la planta *Haru Oni eFuels* de Punta Arenas (Chile) en la Cumbre de IAA en Múnich (HIF Global, 2023 [10])

Por indicar otro ejemplo anterior, en 2014 Audi se aliaba con la empresa *Sunfire* y junto con *Climeworks* inauguraron una planta piloto en Dresden (Alemania) para demostrar la viabilidad de la industrialización de los electrocombustibles, en concreto para producir e-diésel. El trabajo dio sus frutos y en 2018 Audi anunció planes para ampliar la producción de e-diésel (Pérez, 2021) [15].

6. CONCLUSIONES

Para finalizar este repaso a la actualidad de la captura directa del aire, se mencionan algunas conclusiones de lo tratado anteriormente. En primer lugar, los sistemas DAC parecen una tecnología con muchas oportunidades en el futuro, más que en la actualidad, debido a la poca capacidad de captura existente hoy y en los años próximos. Sin embargo, la captura de CO₂ directamente de la atmósfera parece una solución necesaria para reducir o mantener la concentración del dióxido de carbono en el aire a lo largo de este siglo. Para ello, según lo estudiado, la tecnología DAC, con un posterior almacenamiento será la ruta más utilizada. Aunque no hay que olvidar que usar ese CO₂ como un posterior combustible (electrocombustibles) puede ser otra ruta interesante hasta encontrar otras formas de almacenamiento energético para las baterías de los vehículos. Como se menciona en este estudio no hay que utilizar las tecnologías DAC con la excusa de seguir emitiendo CO₂ dado que lo único que conseguimos es seguir aumentando la concentración. La clave es saber combinar el almacenamiento y la utilización del CO₂ a la vez que fuentes de emisiones bajas en carbono. De esta forma y con mayor apoyo político y privado se podrá lograr reducir significativamente la concentración a finales del siglo. El resto de las esperanzas a 2030 y 2050 parecen demasiado optimistas y poco realistas.

7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a la profesora Blanca Arenas por el apoyo y seguimiento del evento y de las ponencias en general. Y finalmente a mis compañeros de InnovAuto 2024 por conseguir que el evento y las ponencias tuvieran el nivel esperado.

8. REFERENCIAS

- [1] Altamash, T., Amhamed, A., Aparicio, S., Atilhan, M. (2020). *Effect of hydrogen bond donors and acceptors on CO₂ absorption by deep eutectic solvents*. Processes.
- [2] Barzagli, F., Giorgi, C., Mani, F., Peruzzini, M. (2020). *Screening study of different aminebased solutions as sorbents for direct CO₂ capture from air*. ACS Sustain.
- [3] Bisotti, F., Hoff, K., Mathisen, A., Hovland, J. (2024). *Direct Air capture (DAC) deployment: A review of the industrial deployment*. Chemical Engineering Science 283.
- [4] Budinis, S. (2022). *Direct Air Capture, A key technology for net zero*. International Energy Agency, IEA.

- [5] Bunidis, S. (24 de abril de 2024). *Direct Air Capture*. International Energy Agency, IEA. Recuperado el 29 de abril de 2024. <https://acortar.link/ucZnep>
- [6] Clean Air Task Force, CATF (3 de agosto de 2023). *US Carbon Capture Activity and Project Map*. <https://www.catf.us/es/ccsmapus/>
- [7] Dubey, A., Akhilesh Arora, A. (2022). *Advancements in carbon capture technologies: A review*. Journal of Cleaner Production 373.
- [8] Favre, E., Svendsen, H. (2012). *Membrane contactors for intensified post-combustion carbon dioxide capture by gas-liquid absorption processes*. J. Membr. Sci. 407.
- [9] Hausfather, Z. (2015). *Bounding the climate viability of natural gas as a bridge fuel to displace coal*. Energy Policy 86, 286–294
- [10] HIF Global (3 de septiembre de 2023). *HIF Global, Porsche and Volkswagen Group Unveil New Direct Air Capture Unit*. PR Newswire. <https://acortar.link/x93Xjm>
- [11] Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- [12] Lackner, K., Ziock, H.-J., Grimes, P. (1999). *Carbon Dioxide Extraction from Air: Is it an Option?* Los Alamos National Lab. (LANL).
- [13] McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. White, K.S. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [14] Papeles de Energía. (16 de junio de 2023). *Perspectivas para la captura de CO₂ en España*. Funcas. <https://acortar.link/bsWdon>
- [15] Pérez, E. (21 de marzo de 2021). *Qué es el e-diésel: el prometedor combustible sintético basado en "agua y aire" compatible con los motores convencionales*. Xataka. <https://acortar.link/1e4zxV>
- [16] Sandalow, D., Friedmann, J., McCormick, C., McCoy, S. (2018). *Direct Air Capture of Carbon Dioxide*. Innovation for Cool Earth Forum (ICEF)
- [17] Sodiq, A., Abdullatif, Y., Aissa, B., Arash Ostovar, A., Nassar, N., Muftah El-Naas, M., Amhamed, A. (2023). *A review on progress made in direct air capture of CO₂*. Environmental Technology & Innovation 29.
- [18] Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., Qin, D. (2007). *Climate Change 2007-the Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press.

- [19] Yagmur, A., Dogan Erdemir, D., Ibrahim Dincer, I. (2024). *Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research*. Environmental Research 240.
- [20] Zeman, F.S., Lackner, K.S. (2004). *Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere*. World Resour. Rev. 16, 157–172.

3. Requerimientos de los motores de combustión interna para el uso eficiente de biocombustibles

Guillermo San Antolín Anaya

ABSTRACT

The emergence of biofuels as alternatives to gasoline and diesel to reduce the environmental impact of heavy and passenger transport is becoming increasingly important. However, these changes bring with them fuel specifications and properties that require adaptations to combustion engines in order to be able to continue to perform their function without loss of performance. The degradation of certain materials and components in engines when running on biodiesel, as well as the fuel's viscosity and low volatility, compromise the engine's energy efficiency, posing quite a challenge. Bioethanol, on the other hand, mainly focuses its problems on the corrosion of many fuel components in gasoline engines.

Although hydrogen is not classified as a biofuel, it is also present among the alternatives to fossil fuels with two different technologies, the fuel cell and the combustion engine. Regarding the latter alternative, the adaptation of gasoline and diesel engines for operation with hydrogen has been proposed, with a major problem being the safety of storing the fuel in the vehicle.

Keywords: Biofuels, Combustion engines, Energy efficiency, Technological adaptation, Hydrogen

RESUMEN

La irrupción de los biocombustibles como alternativas a la gasolina y el gasóleo con el fin de reducir el impacto medioambiental en el transporte pesado y de personas cada vez cobra una mayor importancia. Sin embargo, estos cambios traen consigo unas especificaciones y propiedades de los combustibles, que implican adaptaciones de los motores de combustión para poder seguir cumpliendo con su función sin pérdida de prestaciones. La degradación de ciertos materiales y componentes en los motores al funcionar con biodiésel, así como la viscosidad y baja volatilidad del combustible comprometen la eficiencia energética del motor, representa un desafío técnico significativo. El bioetanol por su parte centra principalmente sus problemas en la corrosión de muchos componentes de la alimentación en motores de gasolina.

A pesar de que el hidrógeno no es catalogado como biocombustible, está también presente entre las alternativas a los combustibles fósiles con dos tecnologías diferentes, la pila de combustible y el motor de combustión. En lo que respecta a esta última alternativa, se ha planteado la adaptación de motores de gasolina y diésel para su funcionamiento con hidrógeno, suponiendo un gran problema la seguridad del almacenamiento del combustible en el vehículo.

Palabras clave: Biocombustibles, Motores de combustión, Eficiencia energética, Adaptación tecnológica, Hidrógeno

1. MODIFICACIONES EN MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO PARA SU FUNCIONAMIENTO CON BIOETANOL

La utilización de motores de encendido provocado en el transporte pesado es muy reducida ya que se opta por los motores de encendido por compresión debido principalmente a su menor consumo. En lo que concierne a los motores de gasolina, las emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero han cobrado importancia en las últimas décadas con normativas muy restrictivas. Por ello, la sustitución de la gasolina por combustibles que permitan una reducción de dichas emisiones netas se ha planteado como una solución para especialmente cumplir con las normativas que puedan venir en un futuro cuando se llegue a eliminar la oferta de gasolina derivada de los combustibles fósiles.

La utilización del bioetanol como combustible sustitutivo de la gasolina en motores de encendido provocado puede permitir llegar a cumplir con dichos objetivos, ya que por ejemplo se consigue una reducción de las emisiones de CO entre un 25% y un 30%. Sin embargo, la utilización de este biocombustible trae implicaciones en lo que a emisiones de NOx y COV se refiere, reducción del poder calorífico y también otros problemas relacionados con ciertos materiales del motor. A continuación, se exponen algunas de las modificaciones necesarias para tratar de paliar dichos problemas [1].

- Mayor relación de compresión debido al incremento del índice de octano del bioetanol frente a la gasolina. Este incremento de la compresión permitiría aprovechar mayor energía del combustible y poder obtener prestaciones similares a las del motor funcionando con gasolina.
- Utilización de bujías más frías debido al aumento de temperatura en la cámara de combustión del cilindro, mejorando así la capacidad de soportar la mayor presión media efectiva que se produce.
- Modificación de la proporción aire gasolina en el carburador, modificando incluso el nivel de combustible en el carburador. En el caso de contar con sistemas de inyección de gasolina, se requiere a su vez un cambio en el dosado ya que el dosado estequiométrico cambia al utilizar bioetanol.
- Modificación del diseño del colector de admisión de manera que se eleve su temperatura de funcionamiento para compensar el enfriamiento producido por el calor latente absorbido por el bioetanol en su evaporación. Este fenómeno también se produce con la gasolina, pero en mucha menor medida con un calor latente de vaporización de 78 kcal/kg frente a los 200 del bioetanol. En caso de no tenerse en cuenta este aspecto se llegaría a la condensación de la mezcla o incluso la congelación del colector.

El alcohol hidratado absorbe un 130% más de energía en su paso a través del colector en comparación con la gasolina, lo que hace conveniente aumentar la velocidad de flujo, reduciendo la sección del colector.



Figura 1. Condensación en el colector de admisión en la fotografía de la izquierda debido al calor absorbido por la gasolina en su vaporización en el carburador. Solución implementada en la fotografía de la derecha basada en conectar el colector de escape con el de admisión, evitándose así la congelación

- Se hace necesaria la incorporación de un sistema que facilite el arranque en frío, en caso contrario sería difícil conseguir la vaporización del alcohol en el colector de admisión. A diferencia de la gasolina, la curva de destilación del alcohol en la que se puede ver la evaporación del combustible a cada temperatura, es casi recta. Por su parte la gasolina, para una temperatura baja y próxima a la del ambiente se evapora hasta un 10%, sin que la evaporación sea completa hasta cerca de los 200 °C. Este porcentaje del 10% evaporado se mezcla casi instantáneamente con el aire y es suficiente para que se produzca el arranque.

Otras posibles soluciones a este problema pasan por la implementación de calentadores eléctricos que permitan mejorar el arranque en frío como ya se utilizan en los motores diésel.

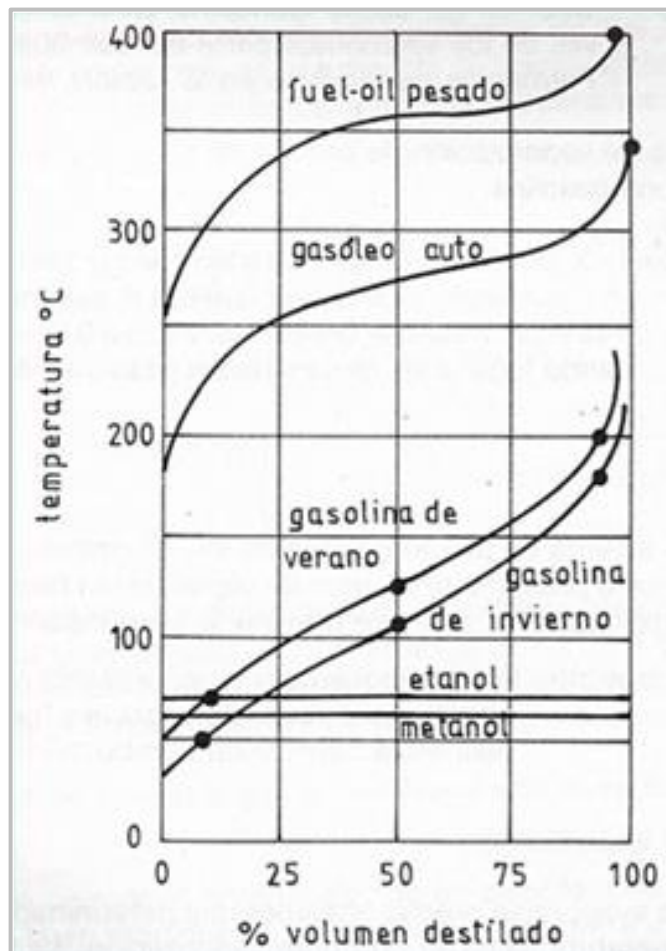


Figura 2. Curva de destilación de diversos combustibles. En la gráfica se puede ver la planitud de la curva de destilación del etanol frente a la de la gasolina. A bajas temperaturas la gasolina se consigue destilar en un bajo porcentaje en volumen, el etanol por su parte requiere de temperaturas mucho mayores para iniciar la destilación [3]

- Adaptación de determinados componentes para que resistan el ataque del alcohol. Esto es especialmente necesario en el depósito, que debe fabricarse con acero inoxidable o ser de plástico. Respecto a los manguitos de combustible, estos podrían ser de PVC, en caso de que se encuentren por debajo de 70 °C. En el caso de que el motor cuente con carburador, este debería contar con tratamientos superficiales a base de estaño o bicromato de sodio.

Otras modificaciones que se han planteado hasta el momento pasan por la utilización de nuevos pistones y segmentos, otras formas de la cámara de combustión y sobre todo bombas de combustible resistentes a la corrosión [2].

Por otra parte, diversos estudios realizados por la compañía Orbital Engine se han centrado en la compatibilidad de la mezcla etanol-gasolina E20 (20% etanol) con diversos componentes del motor. En la prueba realizada se sumergieron a una mezcla de E20 durante 2000 horas diversos componentes del motor, que normalmente se encuentran en contacto directo con el combustible y se observaron diferentes reacciones de estos con la mezcla.

Entre los componentes de plástico del motor analizados en dicho estudio, se vio que los componentes que eran sensibles a la mezcla se ablandaron o perdieron dureza causando un cambio en la forma del componente. Los componentes más afectados fueron:

- Diafragma regulador de gasolina
- Juntas plásticas
- Pintura de la superficie de la cubierta del inyector
- Dilatación de los manguitos de combustible
- Adhesivos
- Carcasas de los filtros

Como conclusión, la utilización de bioetanol como combustible en los motores de encendido provocado incurre en problemas para componentes metálicos y el daño provocado depende del grado de corrosión de los materiales de las piezas que se encuentran en contacto con el bioetanol dentro del motor. En cuanto a los efectos en los componentes plásticos, sus deformaciones podrían generar a largo plazo filtraciones de combustible.

2. MODIFICACIONES EN MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN PARA SU FUNCIONAMIENTO CON BIODIÉSEL

El motor diésel, que es uno de los principales motores del transporte, ha sufrido muchas modificaciones desde su invención para lograr un mejor rendimiento, un menor consumo de combustible y menores emisiones. Gracias a la mayor densidad energética del gasóleo estos motores ofrecen una mayor autonomía, lo que los convierte en la alternativa idónea para el transporte pesado.

Aunque el biodiésel ha surgido como una alternativa medioambientalmente más sostenible frente al gasóleo para motores de encendido por compresión, la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas sigue siendo una de las principales preocupaciones en dichos motores. Por lo tanto, el objetivo es conseguir reducir dichas emisiones modificando los componentes o sistemas del motor que funcionen con mezclas de biodiésel y gasóleo. El flujo de fluido en el colector de admisión, el sistema de inyección de combustible o la propia combustión son relevantes para un mejor rendimiento, eficiencia, emisiones y requisitos de combustible [5].

A continuación, se revisan las investigaciones llevadas a cabo modificando los diferentes componentes del motor destacando el sistema de alimentación, el colector de admisión, la inyección de combustible y el colector de escape.

2.1. Modificaciones del sistema de alimentación

La longevidad de los distintos componentes que garantizan el suministro de combustible al motor cobra especial relevancia en el caso del biodiésel debido a su alta

densidad, viscosidad y presencia de oxígeno en el combustible. En la actualidad este biocombustible es comercializado en las gasolineras formando una mezcla con gasóleo, típicamente del 5% de biodiésel (B5), actualmente en Europa se comercializa B7 y en otros mercados B10. En concentraciones superiores se ven comprometidos ciertos componentes por la presencia en el biodiésel de ciertas impurezas relacionadas con la producción.

Entre las impurezas más destacables se encuentran los iones alcalinos y alcalinotérreos que forman jabones en presencia de los ácidos grasos del biodiésel pudiendo taponar filtros, bombas inyectoras y boquillas. La glicerina y los glicéridos por su parte aceleran el coque de las boquillas o toberas de los inyectores provocando su taponamiento, algo que se ha podido también observar en los filtros. La presencia de humedad en el combustible también desencadena problemas de corrosión.

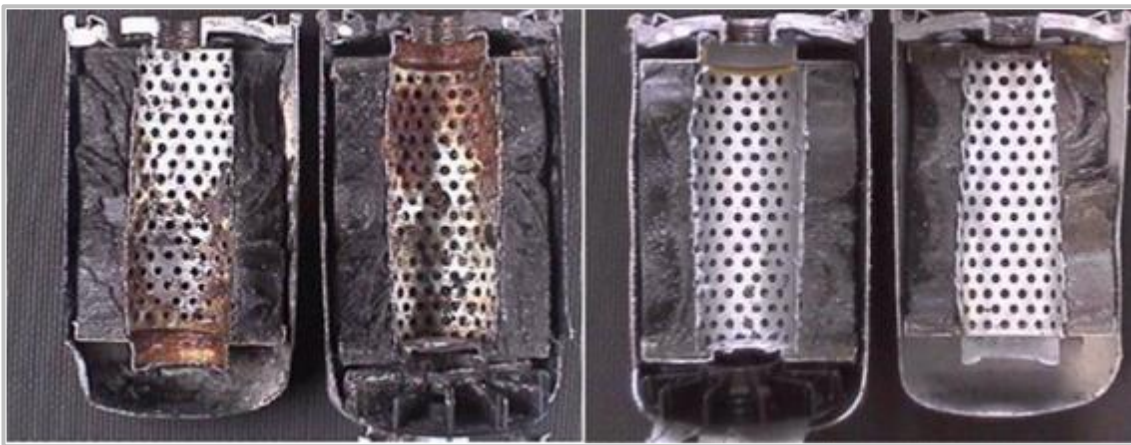


Figura 3. En la fotografía izquierda se puede observar la oxidación del filtro debido a la presencia de humedad en el biodiésel. En la fotografía de la derecha se puede observar un filtro sin corrosión debido a la utilización de un biodiésel de baja concentración en humedad [6]

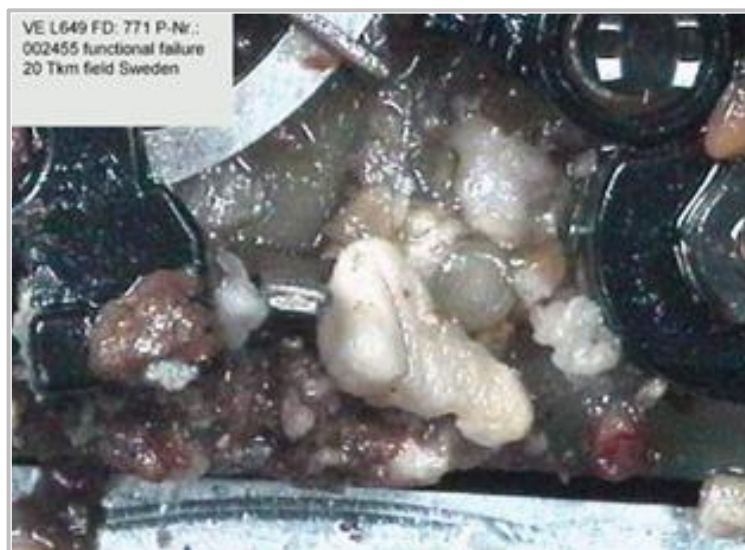


Figura 4. Formación de jabones en una bomba inyectora debido a la presencia de ácidos grasos en el biodiésel [6]

Todos estos problemas se resuelven en la actualidad con la mencionada reducida concentración de biodiésel en el combustible. La utilización de combustible B100 (100% biodiésel) implicaría la necesidad de en primer lugar garantizar el cumplimiento de las especificaciones contempladas por la legislación vigente que regula la concentración de impurezas, humedad y la presencia de oxígeno en el combustible. A su vez, serían necesarias las sustituciones de algunos componentes como las gomas de nitrilo, cambios de los filtros de combustible cada 4 o 6 meses y verificación con regularidad del estado del tanque de combustible, los sellos, juntas, manguitos e incluso la bomba inyectora y los inyectores, aunque la concentración de ácidos grasos y glicerina es reducida en caso de que el biodiésel cumpla la legislación vigente.

2.2. Modificaciones del colector de admisión

El flujo de aire, o de la mezcla de aire y combustible en motores de inyección indirecta, en el colector de admisión es un fenómeno complejo en los motores diésel y gasolina. La eficacia de la admisión depende del diseño implementado, a expensas de conseguir una óptima eficiencia volumétrica. Entre las modificaciones más efectivas llevadas a cabo en los colectores para motores que funcionen con mezclas de biodiésel y gasóleo se encuentran las siguientes.

2.2.1. Adición de hidrógeno

Entre los beneficios que se encontraron con la inyección de hidrógeno en el colector de admisión se encuentra principalmente la mejora en el contenido energético del combustible. A su vez se produjo una reducción en el consumo específico y emisiones como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC). Sin embargo, se produce un aumento de óxido de nitrógeno (NO_x) en el escape debido al incremento de temperatura en el cilindro.

En lo que respecta a otros beneficios no se manifiestan cambios significativos en la combustión al enriquecer con hidrógeno la mezcla de gasóleo y biodiésel [7]. Las pruebas realizadas utilizando gasóleo y aceite de semilla de uva puro para diferentes proporciones de adiciones de hidrógeno mostraron un aumento en la eficiencia térmica del 3% al 4%.

Entre las soluciones implementadas con el objetivo de reducir las emisiones de NO_x se encuentra la implementación de un sistema de reciclado de gases de escape EGR. Gracias a este sistema se consigue reducir la temperatura dentro del cilindro y la consecuente reducción en la formación de NO_x .

Otras soluciones pasan por la introducción de agua en la mezcla formando emulsiones con el biodiésel permitiendo así aumentar la eficiencia térmica y reduciéndose la formación de NO_x . De hecho, se han conseguido mediante este sistema reducciones de hasta un 32 % en la formación de NO_x , del 7,4 % en el humo y una reducción del 2,3 % y del 1 % en CO e hidrocarburos [8].

2.2.2. Fumigación con alcohol

La fumigación de etanol en el colector de admisión permite mejorar las propiedades de la mezcla con reducciones de hasta un 69% de humo, así como de CO y CO_2 . Sin

embargo, se ha constatado un incremento en las emisiones de hidrocarburos y en el consumo específico de combustible. En lo que respecta al NOx, también se produce un incremento ya que la duración de la combustión se ha comprobado en ciertos casos que es menor, provocando un aumento en la tasa de liberación de calor [9].

Por otro lado, una mayor viscosidad y una baja volatilidad son los dos principales problemas asociados con el biodiésel cuando se utilizan directamente en motores diésel. Para superar estos problemas, la inyección de alcohol se ha planteado como solución permitiendo mejorar el rendimiento. Sin embargo, de nuevo se ha visto un aumento de los niveles de óxidos de nitrógeno [10].

Una solución planteada al problema del NOx ha sido la mezcla de etanol y agua en un motor diésel funcionando con biodiésel e inyección *common rail*. La mezcla vaporizada de etanol y agua se inyectó en el colector de admisión a diferentes caudales y la configuración de prueba para la inyección múltiple se muestra en la Figura 5. Gracias a la inyección de dicha mezcla se reduce la temperatura de la cámara y consecuentemente las emisiones de NOx.

A pesar de los beneficios de esta tecnología, el material típicamente utilizado para los sistemas de inyección de etanol en los colectores es principalmente acero al carbono, que es propenso a sufrir corrosión por la presencia de sulfuro de hidrógeno en el material. Dicha corrosión no proporciona ningún tipo de advertencia previa sobre el fallo y tiene más efectos adversos [11]. Este problema se resolvería con colectores de admisión de acero inoxidable o con tratamientos superficiales que permitan evitar dicha corrosión.



Figura 5. Instalación de un inyector de etanol en un colector de admisión [10]

2.2.3. Fumigación con gasolina

En los motores de gasolina de inyección indirecta, el aire y la gasolina se mezclan previamente fuera del cilindro durante la carrera de admisión del ciclo. Si dicha mezcla de gasolina y aire se fumigase en motores diésel, se ha comprobado que el rendimiento del motor y las emisiones mejorarían [12].

Este concepto de fumigación con gasolina ha sido probado también en motores diésel alimentados con biodiésel B20 mostrándose un ligero aumento en la formación de NOx, acompañado de una reducción considerable de HC, CO y humo en el escape [13].

2.2.4. Incorporación de paletas guía

El comportamiento del flujo de aire tanto en el colector de admisión como en el cilindro son factores esenciales para formar una mezcla ideal de aire y combustible. A medida que aumenta la velocidad del motor se produce un incremento de la turbulencia en el cilindro, esto permite mejorar la evaporación del combustible, la formación de la mezcla y la eficiencia de la combustión [14]. La naturaleza del flujo de aire en el colector de admisión de un motor es un fenómeno complejo que hace difícil determinarlo experimentalmente. Este factor ha llevado a muchos investigadores a confiar en la simulación en lugar de la experimentación.

Dichas turbulencias se pueden desarrollar mediante diseños de cámaras que no cuentan con una superficie plana en el pistón. Sin embargo, otro foco de estudio ha sido la introducción de paletas guía con diferentes ángulos en el colector de admisión ayudando a la formación de la mezcla y vaporización de biodiésel con alta viscosidad. Con ello se vio mediante simulación que manteniendo constantes el resto de los parámetros, como la altura, el número y la longitud de las paletas, el ángulo óptimo de estas, era 35°. La Figura 6 muestra las fotografías de las diferentes paletas guía.

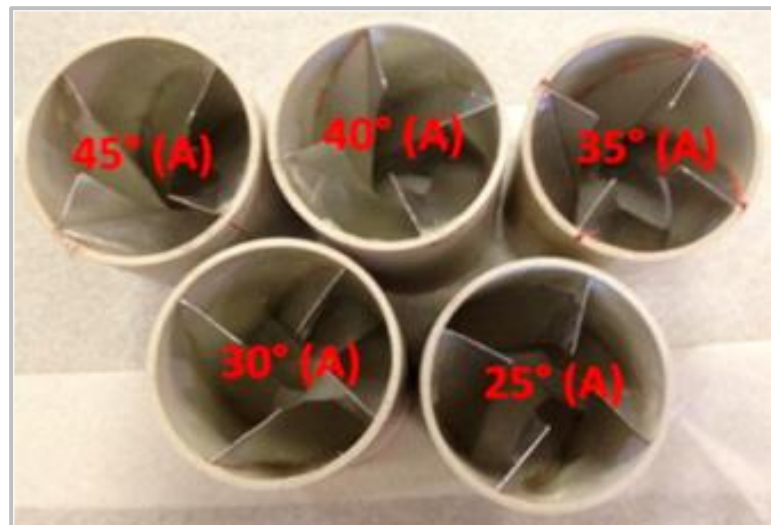


Figura 6. Imágenes de las paletas guía [16]

La elección de 35° estuvo fundamentada en la eficiencia obtenida, el consumo de combustible específico y las emisiones [15]. En esta misma investigación se analizó más a fondo el rendimiento optimizando la altura de la paleta mediante simulación hasta 0,70 veces el radio del colector de admisión. Gracias a esto se consiguió una mayor reducción del consumo específico, CO y HC, así como se mejoraba la eficiencia térmica del motor de la investigación funcionando con biodiésel.

En lo que respecta a la alta viscosidad del combustible, se trató de resolver el problema instalando un dispositivo de giro de las paletas guía en el sistema de admisión de aire

para ayudar a romper eficazmente las partículas de biodiésel y mezclarlas con las moléculas de aire.

Por lo tanto, se puede afirmar que, al optimizar la altura, el número y la longitud de las paletas guía, podría mejorar la eficiencia de la combustión, además de mejorar el rendimiento y reducir las emisiones de los motores que funcionan con biodiésel.

2.2.5. Revestimiento de barrera térmica

Los materiales utilizados en las camisas de los cilindros requieren de propiedades que permitan resistir las altas presiones y temperaturas que tienen lugar durante el proceso de combustión y expansión del motor diésel. Algunas investigaciones se han centrado en este campo con la modificación de materiales presentes en el pistón, válvulas y camisa del cilindro, recubriendo esta última con capas de diferentes materiales de matriz cerámica y nanopartículas de TiO_2 . En lo que respecta a los recubrimientos del pistón y las válvulas, se aplicaron dos capas de revestimiento de acero al cromo níquel aluminio (NiCrAl), mediante el método de recubrimiento por pulverización de plasma. Además, esta capa se recubrió con una capa de 400 μm que constaba de una mezcla de ZrO_2 , MgO y alúmina.

Las pruebas de rendimiento y emisiones se llevaron a cabo utilizando biodiésel procedente de aceite de cocina usado en las mismas condiciones de funcionamiento del motor, tanto para el motor con dichos revestimientos como para el motor sin modificaciones. Los resultados revelaron que el rendimiento fue mejor y parámetros como el consumo de combustible específico se redujeron considerablemente junto con menores emisiones. Sin embargo, si pudo constatar un aumento de NO_x debido al evidente aumento de la temperatura de combustión [16].

2.2.6. Precalentamiento de motores de biodiésel

Como ya se ha mencionado uno de los mayores problemas que presenta el biodiésel está ligado a su viscosidad, gracias al precalentamiento se puede disminuir su viscosidad y hacerlos adecuados para motores diésel. Entre las pruebas realizadas en este campo, al principio el combustible se calentaba a 102 °C en el colector de admisión, lo que permitía reducir la viscosidad cinemática y la densidad del biodiésel en un 49% y un 4,3% respectivamente. Con ello se aumentaba la eficiencia térmica y se reducía la formación de emisiones como los hidrocarburos no quemados y el CO, pero los NO_x aumentaron en un 17,5%, resolviéndose dicho incremento con la implementación de una unidad EGR [17].

En lo que se refiere al calor necesario para el precalentamiento, se recurrió a la alta temperatura de los gases de escape para precalentar el biodiésel elaborado con aceite de palma. De este ensayo se pudo ver que la mezcla de 20% de aceite de palma y gasóleo era la más adecuada para diferentes rendimientos y parámetros de emisiones. De hecho, el aceite de palma precalentado con la adición de un antioxidante dio un mejor rendimiento con niveles de emisiones más reducidos incluso que con gasóleo.

Tras el análisis de las diferentes modificaciones que se han experimentado en el colector de admisión de los motores diésel, se expone a continuación en la Figura 7 un resumen de las modificaciones con sus ventajas e inconvenientes.

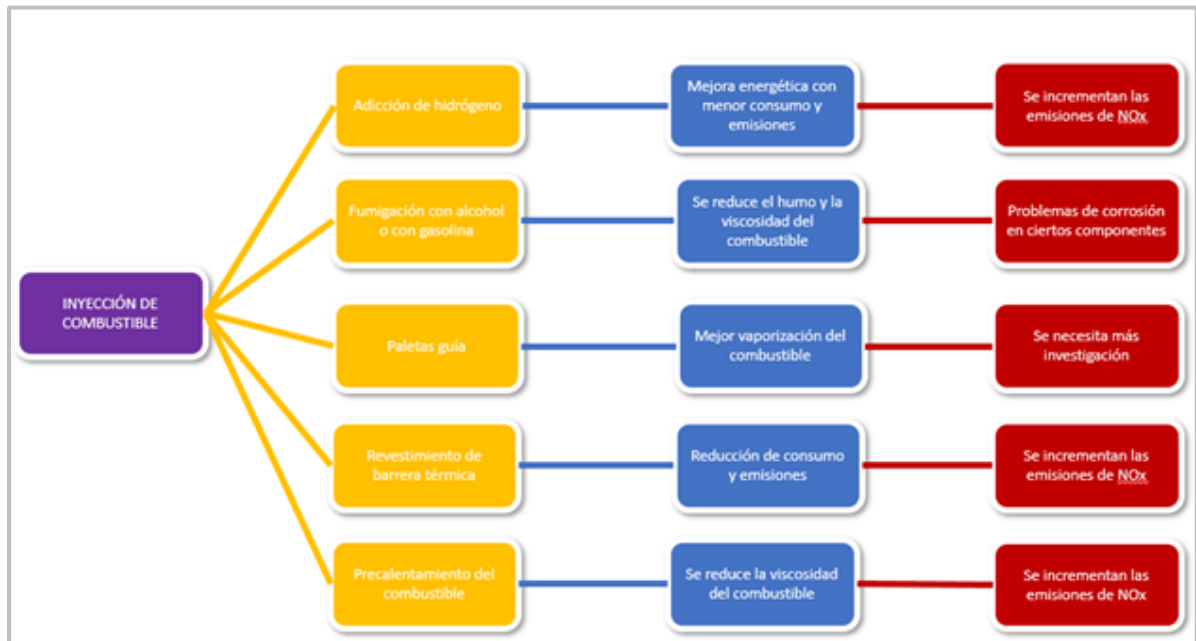


Figura 7. Diagrama esquemático de modificaciones del colector de admisión [32]

2.3. Inyección de combustible

La inyección de combustible afecta significativamente la combustión y las emisiones, destacando entre los componentes principales de un sistema de inyección de gasoil, la bomba de inyección, el tubo de suministro y las boquillas de los inyectores de combustible. Entre los requisitos de un sistema de inyección de combustible se encuentran

- La necesidad de inyectar el combustible en el momento deseado de la combustión
- El combustible inyectado debe tener la calidad correcta para permitir un funcionamiento de la bomba y del motor correcto
- La pulverización debe garantizar una rápida mezcla del aire con el combustible

La cantidad de combustible inyectado, el diseño de la boquilla de combustible y la presión de inyección de combustible afectan a las características del rociado de gasóleo y su mezcla con el aire en la cámara de combustión. Por ello, la utilización de combustibles más viscosos y difíciles de pulverizar llevan a requerir modificaciones en estos parámetros.

2.3.1. Geometría de la boquilla

La geometría de la boquilla es uno de los parámetros de los que depende la calidad de atomización del combustible. De hecho, la efectividad de la combustión y el rendimiento de un motor de encendido por compresión depende de dicha geometría de la boquilla [18].

Entre las pruebas realizadas con biodiésel mezclado con gasóleo se pudo ver el impacto de la modificación del diámetro de la boquilla en el rendimiento, la combustión

y las emisiones. La boquilla del inyector de combustible se probó con tres orificios de diferentes tamaños con diámetros de 0,20 mm, 0,28 mm y 0,31 mm, como se muestra en la Figura 8.

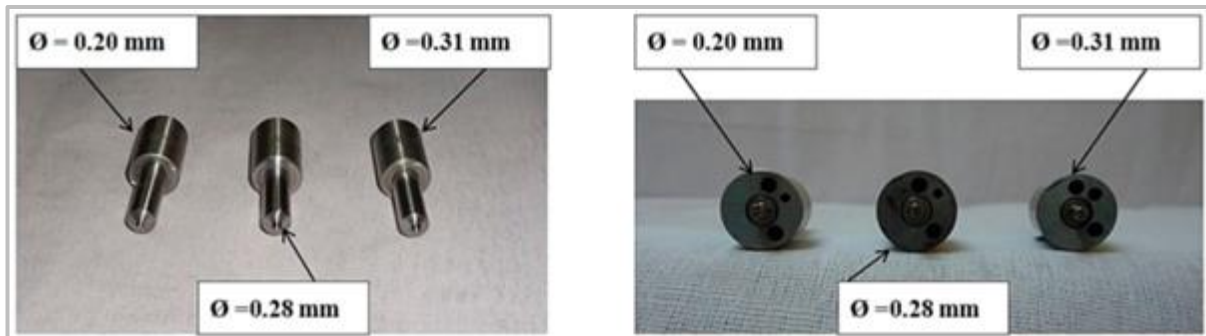


Figura 8. Boquillas de diferentes tamaños [18]

Los resultados mostraron que los parámetros de rendimiento, combustión y emisiones fueron mejores para un diámetro de boquilla más pequeño de 0,20 mm porque se producía una mejoría en la atomización del biodiésel, lo que hace que la combustión sea más eficiente. Sin embargo, se pudo ver un aumento notable en la formación de NO_x [19].

Otros estudios realizados se centraron en los efectos combinados de la geometría de la boquilla y las formas de la cámara de combustión. Las pruebas llevadas a cabo de rendimiento y emisiones, con diferentes mezclas de biodiésel y gasóleo, compararon los resultados de un motor no modificado con boquillas de tres orificios y cámara de combustión hemisférica con otras formas de cámara de combustión, como cámaras de combustión cilíndrica, SCC (cámara de combustión de poca profundidad) y toroidal con boquillas de cinco orificios en los inyectores. Las condiciones de funcionamiento del motor, como la presión de inyección, el tiempo de inyección y la relación de compresión, se mantuvieron constantes.

Entre los resultados se pudo observar una reducción de las emisiones en los motores modificados. Gracias al aumento del número de orificios del inyector disminuyó de esa forma la opacidad del humo, el CO, los HC y aumentaron el NO_x y CO₂, especialmente para las mezclas de biodiésel-gasóleo con mayor concentración, B50 y B100.

El aumento en la formación de NO_x también se observó recurriendo a la multiinyección junto con una disminución en la formación de hollín, HC y CO. Entre las soluciones implementadas para reducir el NO_x, se añadieron nanopartículas de óxido de cerio al biodiésel, actuando como catalizador de oxidación y reducción, proporcionando oxígeno para la oxidación de CO y reduciendo el oxígeno disponible para la formación de NO_x [20]. Otra alternativa para reducir las emisiones de NO_x fue la implementación de 6 orificios en las boquillas de los inyectores, mitigando además las emisiones de otros gases [21].

2.3.2. Inyección múltiple

El desarrollo de estrategias avanzadas de multiinyección es posible hoy día gracias al control y operación electrónica del sistema de inyección de combustible. Entre las

distintas estrategias utilizadas se incluyen el cambio de la presión de inyección, el tiempo de inyección y el intervalo de inyección.

Una de las mayores ventajas de estas inyecciones se encuentra en su eficacia frente a problemas asociados con las emisiones de escape, especialmente la formación de NOx y partículas de los motores diésel sin añadir más complejidad al motor existente. Los efectos sobre la temperatura de la llama y el hollín se estudiaron con biodiésel y gasóleo como combustibles tanto de forma numérica como experimentalmente en diferentes tiempos y cantidades de inyección. De esta investigación se concluyó que el motor alimentado con biodiésel desarrolló una temperatura de llama más alta y una menor formación de hollín que su homólogo alimentado con gasóleo. Gracias a dicha multiinyección se mejora la atomización del biodiésel y, por lo tanto, se forma una mejor mezcla con el aire [22].

Otras pruebas realizadas utilizando diferentes mezclas de biodiésel en un motor de inyección directa *common rail* mostraron una eficiencia térmica más alta cuanto mayor era la concentración en biodiésel del combustible. Sin embargo, las mezclas de biodiésel y gasóleo con menor concentración produjeron menores emisiones de CO y HC, que el gasóleo, pero con un aumento de nuevo del NOx. La formación de NOx se consiguió disminuir considerablemente con la implementación de una recirculación de los gases de escape (EGR), pero la formación de hollín aumentó ligeramente.

Por otro lado, hay dos estudios realizados utilizando ésteres metílicos de aceite de coco y mezclas de gasóleo con estrategias de inyección de dos y tres etapas. Ambas estrategias produjeron menos NOx y humo [23]. El motor utilizado para las pruebas se muestra en la Figura 9.

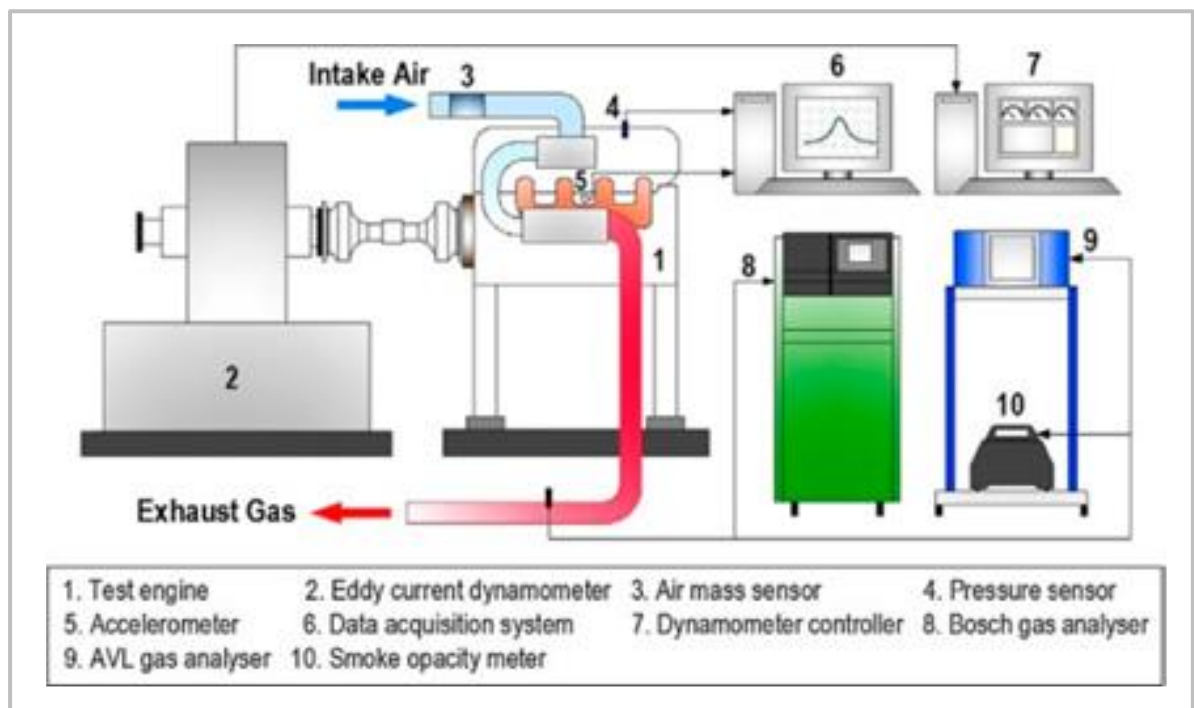


Figura 9. Motor de inyección multietapa [23]

Con todo ello, los sistemas de multiinyección con biodiésel no han permitido reducir las emisiones de NOx frente a los motores diésel, pero la inyección en tres etapas ha demostrado ser más eficaz para controlar simultáneamente el NOx y otras emisiones [23]. Estos resultados sugieren que futuras estrategias de inyección multietapa podrían ofrecer mejoras adicionales. Así mismo, se podría combinar la multiinyección con otras estrategias como la inyección de agua.

2.3.3. Inyector de solenoide

Gracias a la implementación de las unidades de control electrónico (ECU) en los motores actuales, se están realizando muchas investigaciones para implementar el suministro de combustible mediante dicha unidad de control y aumentar así el rendimiento del motor con emisiones reducidas.

Por otra parte, esta tecnología ha aumentado la complejidad del diseño del motor y su coste, ya que se requiere de un proceso de inyección de combustible muy sofisticado. El rendimiento, el ruido de combustión y las emisiones dependen principalmente de la precisión con la que se suministra el combustible a una presión de inyección elevada [24]. Los inyectores accionados por solenoide se utilizan ampliamente en motores de inyección directa *common rail* demostrando ser una tecnología confiable y eficaz [25].

Entre las pruebas realizadas con biodiésel se comprobó mediante un modelo unidimensional el efecto del combustible sobre el comportamiento hidráulico de un sistema de inyección *common rail* accionado por solenoide. El estudio se realizó caracterizando los diferentes componentes del inyector, analizando estrategias de inyección única y múltiple para gasóleo y biodiésel de colza. Entre los resultados más destacables se vio que el inyector modificado con alta presión de inyección mostraba resultados similares a los obtenidos por el motor diésel estándar. Además, las estrategias de postinyección también dieron resultados similares cuando se compararon con las mismas inyecciones empleando gasóleo [26].

Otras investigaciones se han centrado en una combinación de métodos experimentales y computacionales para evaluar la influencia de las propiedades físicas del biodiésel en el proceso de inyección *common rail* con diferentes estrategias de inyección, incluida la inyección principal y una postinyección más. Los resultados de estas pruebas revelaron algunas diferencias importantes entre el gasóleo y el biodiésel, especialmente a baja presión de inyección. Sin embargo, se propusieron modificaciones en el hardware de la ECU para rectificar las diferencias [27].

2.3.4. Forma de la cámara de combustión en el pistón

Uno de los mayores problemas del flujo de aire tras pasar por los colectores de admisión y entrar en el cilindro es la pérdida de turbulencia. Gracias a las cámaras de combustión en el pistón con las que cuentan los motores diésel se consigue mantener e incluso mejorar la turbulencia. Debido a la presencia de dichos remolinos se consigue aumentar las tasas de transferencia de calor, evaporación, mezcla y combustión, para de esa forma mejorar la combustión en el cilindro.

Ciertas investigaciones se han centrado en el estudio del efecto combinado de diferentes variables del motor y geometrías en la cámara de combustión. En dichas

pruebas parámetros como la presión de apertura de la inyección, el tiempo de inyección, los orificios de las boquillas y la relación de compresión se optimizaron a 230 bar, 26 grados antes del PMS, 18 y cinco orificios, respectivamente. Las pruebas de rendimiento se llevaron a cabo utilizando una mezcla de biodiésel y gasóleo B20 para diferentes tipos de geometrías de cámara de combustión en condiciones óptimas de funcionamiento del motor. Gracias a dichos ensayos se pudo ver que la geometría toroidal daba como resultado un mejor rendimiento, combustión y reducción de emisiones en comparación con otros tipos de geometrías [28].

Tras el análisis de las diferentes alternativas que se han experimentado en el sistema de inyección de los motores diésel, se expone a continuación en la Figura 10 un resumen de las modificaciones realizadas en el sistema de inyección de combustible.

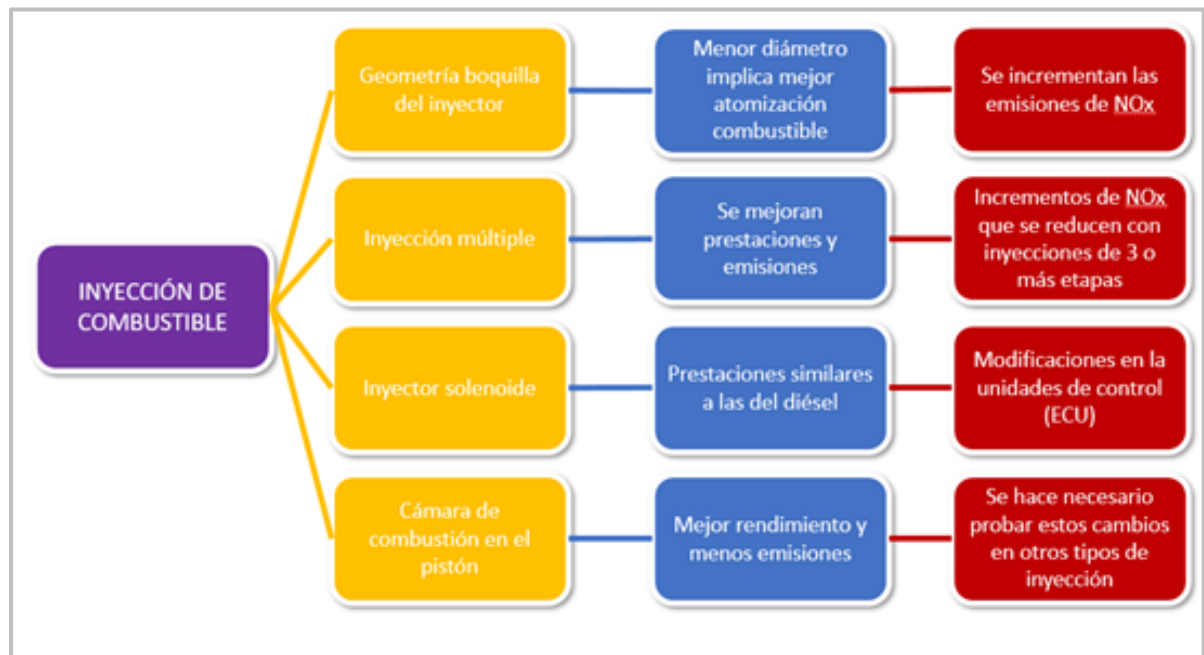


Figura 10. Diagrama esquemático de modificaciones de la inyección de combustible [32]

2.4. Colector de escape

Hasta el momento todas las modificaciones tratadas se han centrado en el colector de admisión y proceso de combustión. Sin embargo, la salida de los gases por el colector de escape trae consigo posteriormente un tratamiento de los gases previos a su liberación a la atmósfera. Los sistemas de reciclado de gases de escape y los convertidores catalíticos son típicamente utilizados en motores diésel, pero alguno de estos sistemas requiere ciertos cambios para funcionar con biodiésel en caso de que se quisiese mejorar o igualar las prestaciones y emisiones que aporta el gasóleo.

2.4.1. Recirculación de gases de escape (EGR)

Esta técnica es ampliamente utilizada para minimizar la formación de NOx en motores de combustión interna. La recirculación consiste en la derivación de una fracción de los gases de escape a través de una válvula de control desde el escape al colector de

admisión del motor, lo que permite reducir la temperatura del cilindro y, por lo tanto, se reduce la cantidad de N_2 que reacciona con el oxígeno para formar NO_x .

Como se ha mencionado ya anteriormente uno de los mayores problemas de los motores de biodiésel es su mayor producción de NO_x , por lo que en la mayoría de las investigaciones anteriormente tratadas se recurría a esta técnica como la más efectiva para la reducción de dichos gases contaminantes. En todos los casos se requirió de una mayor tasa de reciclo en la EGR para reducir la temperatura de combustión [29].

Sin embargo, la implementación de este sistema trajo también consigo un aumento del consumo específico de combustible y una reducción en la eficiencia térmica. Gracias a la nanotecnología, algunos investigadores han conseguido alcanzar bajas emisiones de NO_x sin comprometer el rendimiento del motor mediante la implementación de diferentes técnicas [30], [31]. En los distintos experimentos realizados se recurrió a una mezcla de biodiésel con nanopartículas de TiO_2 en una dosis de 40 ppm en diferentes condiciones de carga del motor. Por su parte las conclusiones obtenidas revelaron que la eficiencia térmica aumentaba en un 2,5% a la vez que la EGR conseguía reducir las emisiones de NO_x .

Otra solución al problema de la eficiencia del motor al contar con una EGR pasa por la implementación de catalizadores selectivos (SCR) para tratar de reducir la tasa de recirculación de gases de escape a la vez que el NO_x es transformado en N_2 y vapor de agua por parte de la reacción selectiva que tiene lugar en el filtro SCR [31]. La Figura 11 muestra un ejemplo de filtro SCR típicamente utilizado en un motor diésel.

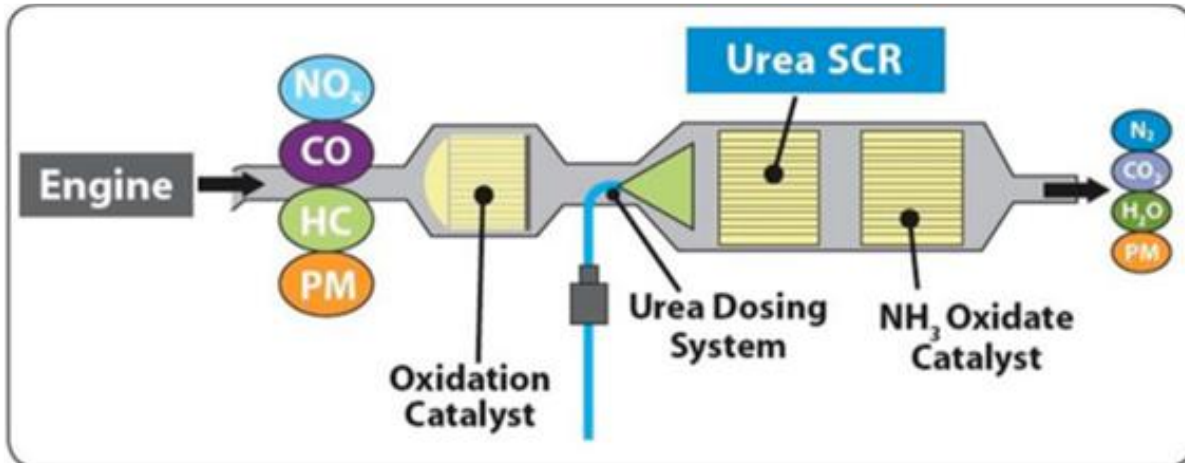


Figura 11. Diagrama esquemático de la geometría de Reducción Catalítica Selectiva (SCR) [32]

Tras el análisis de las diferentes alternativas que se han experimentado en el escape de los motores diésel, se expone a continuación en la Figura 12 un resumen de las modificaciones realizadas en el colector de escape.



Figura 12. Diagrama esquemático de modificaciones del colector de escape [32]

3. CONCLUSIONES

A pesar de que las mayores demandas a la hora de elegir la motorización y combustible de un vehículo siempre se han centrado en sus prestaciones y consumo, la necesidad actual de cumplir con normas anticontaminación y que no supongan un impacto en el efecto invernadero ha llevado a la necesidad de recurrir a nuevos combustibles sustitutivos del gasóleo. Sin embargo, la utilización de biocombustibles requiere la implementación de mejoras y modificaciones en los motores de encendido por compresión para no comprometer las prestaciones y consumos. En esta sección se han revisado varios intentos de mejorar el rendimiento del motor de combustión alimentado con biodiésel, extrayéndose las siguientes conclusiones.

- Es de vital importancia la utilización de biodiésel que cumpla la legislación vigente en lo que a concentraciones de impurezas respecta. Aun así, es necesaria la verificación del estado de componentes como filtros, manguitos, juntas o inyectores cada cierto periodo de tiempo.
- Las modificaciones en el colector de admisión provocan una mayor concentración de NOx pero se puede minimizar utilizando diferentes técnicas, como inyección de agua, inyección de vapor, adición de bioetanol y EGR.
- La multiinyección y la geometría de la boquilla de los inyectores con un diámetro de orificio pequeño brindan un mejor rendimiento con un aumento de NOx, pero la implementación de una inyección en 3 etapas reduce los NOx.
- Una tasa baja de EGR junto con la implementación de un filtro SCR o la inclusión de nanopartículas de TiO₂ en el combustible minimiza la formación de NOx sin afectar al rendimiento.

4. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al equipo docente de la asignatura Organización de Eventos de Difusión Científica la labor realizada durante este semestre, en especial a Blanca del Valle y Francisco Aparicio. Sin la iniciativa de vuestro equipo, este texto jamás se habría publicado.

5. REFERENCIAS

- [1] Márquez, L. (1995). *Los biocarburantes: Limitaciones y perspectivas*. In Energías Renovables, Instituto de Ingenieros de España (Comité de la Energía y Recursos Naturales) ISBN 84-7834-262-1.
- [2] Camps, M. (1994). *Alcohols: Ethanol and methanol*. In. Ruiz-Altisent, M. Ed Application of biologically derived products as fuel or additives in combustion engines. Directorate-General XII, Science, Research and Development. p. 22-50.
- [3] *Características de los combustibles*. (Mayo 2024). [En línea] Disponible: <https://personales.unican.es/ortizff/NPpdf/se/mot/Tema%2005%20v1.pdf>
- [4] I Homer. *Motores y Biocombustible*. (Mayo 2024). [En línea] Disponible: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151135/Motores-y-biocombustibles.pdf?sequence=1>
- [5] Heywood, J.B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1988.
- [6] Ramon H F Aguirre. (2024). *Aplicaciones de los biocombustibles en los motores de combustión interna*. Mayo 2024. [En línea] Disponible: <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12272/4353/1%20TFI%20Aguirre.pdf?sequence=1>
- [7] Aldhaidhawi, M.; Chiriac, R.; Badescu, V.; Descombes, G.; Podevin, P. (2017). *Investigation on the mixture formation, combustion characteristics and performance of a Diesel engine fueled with Diesel, Biodiesel B20 and hydrogen addition*. Int. J. Hydrog. Energy 2017, 42, 16793–16807.
- [8] Perumal, V. & Ilangkumaran, M. (2018). *Water emulsified hybrid pongamia biodiesel as a modified fuel for the experimental analysis of performance, combustion and emission characteristics of a direct injection diesel engine*. Renew. Energy 2018, 121, 623–631.
- [9] Geo, V.E.; Sonthalia, A.; Nagarajan, G.; Nagalingam, B. (2017). *Studies on performance, combustion and emission of a single cylinder diesel engine fuelled with rubber seed oil and its biodiesel along with ethanol as injected fuel*. Fuel 2017, 209, 733–741.
- [10] Krishna, M.M.; Prakash, T.O.; Ushasri, P.; Janardhan, N.; Murthy, P. (2016). *Experimental investigations on direct injection diesel engine with ceramic coated*

- combustion chamber with carbureted alcohols and crude jatropha oil. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 53, 606–628.*
- [11] Joseph, O.O. (2019). *Structural Integrity of Materials in Fuel Ethanol Environments*. In Alcohol Fuels-Current Technologies and Future Prospect; IntechOpen: London, UK, 2019.
 - [12] Sahin, Z.; Kurt, M.; Durgun, O. (2018). *Experimental investigation of gasoline fumigation for different compression ratios in a diesel engine*. Energy Procedia 2018, 147, 268–276.
 - [13] Hoseinpour, M.; Sadrnia, H.; Tabasizadeh, M.; Ghobadian, B. (2018). *Evaluation of the effect of gasoline fumigation on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with B20 using an experimental investigation and TOPSIS method*. Fuel 2018, 223, 277–285.
 - [14] Rakopoulos, C.D.; Kosmadakis, G.; Pariotis, E.G. (2010). *Investigation of piston bowl geometry and speed effects in a motored HSDI diesel engine using a CFD against a quasi-dimensional model*. Energy Convers. Manag. 2010, 51, 470–484.
 - [15] Bari, S.; Saad, I. (2015). *Performance and emissions of a compression ignition (CI) engine run with biodiesel using guide vanes at varied vane angles*. Fuel 2015, 143, 217–228.
 - [16] Aydın, S.; Sayın, C. (2014). *Impact of thermal barrier coating application on the combustion, performance and emissions of a diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel–diesel blends*. Fuel 2014, 136, 334–340.
 - [17] Mekonen, M.W.; Sahoo, N. (2018). *Effect of fuel preheating with blended fuels and exhaust gas recirculation on diesel engine operating parameters*. Renew. Energy Focus 2018, 26, 58–70.
 - [18] Wei, H.; Chen, X.; Wang, G.; Zhou, L.; An, S.; Shu, G. (2017). *Effect of swirl flow on spray and combustion characteristics with heavy fuel oil under two-stroke marine engine relevant conditions*. Appl. Therm. Eng. 2017, 124, 302–314.
 - [19] Kumar, M.V.; Babu, A.V.; Kumar, P.R. (2018). *Experimental investigation on the effects of diesel and mahua biodiesel blended fuel in direct injection diesel engine modified by nozzle orifice diameters*. Renew. Energy 2018, 119, 388–399.
 - [20] Vairamuthu, G.; Sundarapandian, S.; Kailasanathan, C.; Thangagiri, B. (2016). *Experimental investigation on the effects of cerium oxide nanoparticle on Calophyllum inophyllum (Punnai) biodiesel blended with diesel fuel in DI diesel engine modified by nozzle geometry*. J. Energy Inst. 2016, 89, 668–682.
 - [21] Lahane, S.; Subramanian, K. (2014). *Impact of nozzle holes configuration on fuel spray, wall impingement and NOx emission of a diesel engine for biodiesel–diesel blend (B20)*. Appl. Therm. Eng. 2014, 64, 307–314.

- [22] Jeon, J.; Park, S. (2015). *Effects of pilot injection strategies on the flame temperature and soot distributions in an optical CI engine fueled with biodiesel and conventional diesel*. Appl. Energy 2015, 160, 581–591.
- [23] How, H.; Masjuki, H.H.; Kalam, M.; Teoh, Y. (2018). *Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled with biodiesel blended fuels*. Fuel 2018, 213, 106–114.
- [24] Payri, R.; Salvador, F.; Gimeno, J.; De La Morena, J.; Rubio, F.J.S. (2011). *Influence of injector technology on injection and combustion development—Part 2: Combustion analysis*. Appl. Energy 2011, 88, 1130–1139.
- [25] D'Ambrosio, S.; Ferrari, A. (2018). *Diesel engines equipped with piezoelectric and solenoid injectors: Hydraulic performance of the injectors and comparison of the emissions, noise and fuel consumption*. Appl. Energy 2018, 211, 1324–1342.
- [26] Salvador, F.; Gimeno, J.; De La Morena, J.; Carreres, M.; Rubio, F.J.S. (2012). *Using one-dimensional modeling to analyze the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Results of the simulations and discussion*. Energy Convers. Manag. 2012, 54, 122–132.
- [27] Payri, R.; Salvador, F.; Martí-Aldaraví, P.; Martínez-López, J.; Rubio, F.J.S. (2012). *Using one-dimensional modeling to analyse the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Detailed injection system model*. Energy Convers. Manag. 2012, 54, 90–99.
- [28] Khan, S.; Panua, R.; Bose, P.K. (2018). *Combined effects of piston bowl geometry and spray pattern on mixing, combustion and emissions of a diesel engine: A numerical approach*. Fuel 2018, 225, 203–217.
- [29] Shi, X.; Liu, B.; Zhang, C.; Hu, J.; Zeng, Q. (2017). *A study on combined effect of high EGR rate and biodiesel on combustion and emission performance of a diesel engine*. Appl. Therm. Eng. 2017, 125, 1272–1279.
- [30] Praveen, A.; Lakshmi Narayana Rao, G.; Balakrishna, B. (2018). *Performance and emission characteristics of a diesel engine using Calophyllum Inophyllum biodiesel blends with TiO₂ nanoadditives and EGR*. Egypt. J. Pet. 2018, 27, 731–738.
- [31] Solaimuthu, C.; Ganesan, V.; Senthilkumar, D.; Ramasamy, K. (2015). *Emission reductions studies of a biodiesel engine using EGR and SCR for agriculture operations in developing countries*. Appl. Energy 2015, 138, 91–98.
- [32] Yunus Khan, T. M. (2020). *A Review of Performance-Enhancing Innovative Modifications in Biodiesel Engines*. Energies 13, no. 17: 4395. Mayo 2024. [En línea] disponible: <https://doi.org/10.3390/en13174395>

BLOQUE II

Ámbitos y experiencias de utilización de combustibles renovables

4. Combustible renovable en el transporte pesado. Presente y retos futuros

Juan Pedro Tabera Martín

ABSTRACT

Nowadays, achieving a non-emission situation in the industrial sector is one of the most important challenges of the political and scientific society. This is because we have to control the effects of the climate change and maintain a minimum in the quality of the air in order to not provoke different diseases in the society. One of the most important part of industrial sector it is the sector of the transport. In this sector, the transition to alternative fuels without emissions is a necessity that we have to achieve in short or long term. Inside this sector, we have the propulsion with electric batteries or hydrogen for small vehicles but, on the other hand, the medium and long distance heavy vehicles can not be propelled with these electric batteries because of the logistic impossibility in the present and in the near future. In this article, it is defined the different types of fuels that we use currently and can be efficient in the future for the purpose of achieve a non-emission situation in the transport sector starting with the energy transition fuels (natural gas an) and finishing with e-fuels passing through biofuels of first generation (bioethanol and biodiesel) and second generation (biomethane and bio-GLP).

Keywords: carbon neutral biofuels, energy transition fuels, emissions, Otto cycle, diesel engine

RESUMEN

Hoy en día, la descarbonización del sector industrial es uno de los grandes retos que tiene la sociedad política y científica con el fin de controlar el cambio climático y tener una mínima calidad de aire, evitando así la aparición de diferentes enfermedades en la sociedad. Un sector industrial muy importante es el del transporte; en él la transición hacia unos combustibles alternativos que no generen emisiones es una necesidad que hay que cumplir a corto y largo plazo. Dentro de este sector, encontramos la propulsión a través de baterías eléctricas y de hidrógeno para vehículos ligeros, pero, por otro lado, los vehículos pesados de media y larga distancia presentan limitaciones técnicas y logísticas relevantes para la propulsión a través de baterías eléctricas debido a su imposibilidad logística en el presente y en el futuro a corto plazo. En este artículo se definen los distintos tipos de combustibles que se utilizan hoy en día y pueden ser eficientes en el futuro para lograr la descarbonización en este sector del transporte, partiendo de los combustibles de transición energética (gas natural y gas licuado del petróleo) hasta los *e-fuels* pasando por los biocombustibles de primera (biodiesel y bioetanol) y segunda generación (bio-GLP y biometano).

Palabras clave: biocombustibles neutros en carbono, ciclo Otto, combustibles de transición energética, emisiones, motor diésel, otros

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, gran parte de la emisión de gases contaminantes y gases de efecto invernadero provienen de la combustión de motores, la cual genera el movimiento en los diferentes métodos de transporte que existen en la actualidad. El proceso de combustión de un motor consiste en: mezcla de combustible y oxígeno para obtener trabajo el cual genera el movimiento de rotación de las ruedas. Así mismo, se obtiene de esta mezcla calor y emisiones de gases de efecto invernadero como el vapor de agua y el dióxido de carbono, material particulado (de tamaño microscópico) y gases contaminantes como óxidos de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre.

Estas emisiones tienen grandes impactos ambientales. El primer impacto de todos es el calentamiento global, el cual se produce cuando la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera no permite que los rayos solares (que rebotan en la superficie terrestre) salgan hacia el espacio quedando así atrapados, provocando el aumento de la temperatura de la superficie de la tierra generando deshielos y sequías. El siguiente impacto es el aumento de aparición de enfermedades debido a la existencia de gases contaminantes y material particulado en el aire que respiramos.

Estos impactos influyen directamente en nuestra salud y en la viabilidad de la vida en la tierra, y es necesario llevar a cabo una estrategia para erradicar dichas emisiones.

El transporte tiene una importante y peligrosa contribución a las emisiones globales en la Unión Europea como podemos apreciar en la Figura 1.

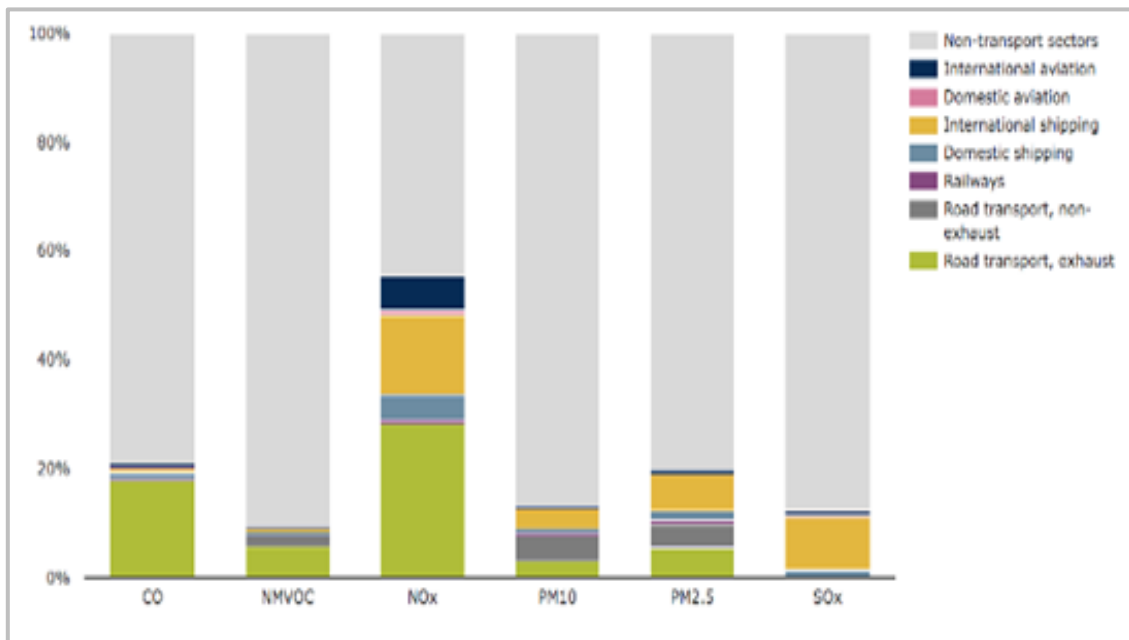


Figura 1. Contribución del transporte en las emisiones totales de contaminación [9]

Además, dentro de la contaminación del transporte terrestre, más de un 38% proviene de la propulsión del transporte pesado de media y larga distancia como podemos apreciar en la Figura 2.

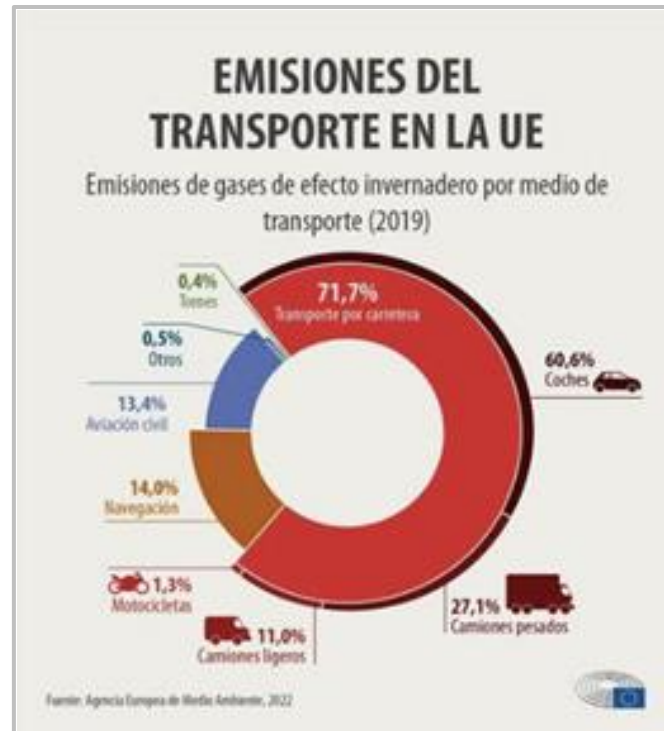


Figura 2. Emisiones de GEI en el transporte en la UE en 2019 [14]

Tras estudiar el impacto ambiental del transporte pesado en la actualidad, es importante tomar como punto de partida los diferentes tipos de propulsión que existen en la actualidad en el transporte pesado. Este se lleva a cabo en gran medida a través de motores diésel, los cuales se usan globalmente con potencias de 400 a 600 CV, tienen una alta eficiencia, durabilidad y mayor torque que los motores de gasolina; estas son las razones del por qué la mayoría del transporte pesado está propulsado con este tipo de motor. Aun así, también existen ejemplos de transporte pesado con motores de gasolina en determinados países como Estados Unidos, China, Rusia y Canadá; estos motores tienen potencias de 300 a 400 CV y por ello se utilizan para camiones de baja carga.

En el transporte ligero, existen varias tecnologías desarrolladas que permiten vislumbrar un futuro cercano de descarbonización de este tipo de transporte a través del hidrógeno y del uso de baterías eléctricas.

En el caso del transporte pesado, la logística de utilizar motores eléctricos es un reto sin una solución en el futuro próximo. Esto se debe a que según datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), para mover un camión de 18 toneladas se necesitan 160 kWh por cada 100 km, una batería NMC convencional cuesta de 100 a 120€/kWh. Realizando el supuesto de un camión de 18 toneladas con 500 km de autonomía, se necesitaría una batería de 600 kWh con un precio de 60.000€; además de un peso mayor a la tonelada [6].

Estas cifras no concuerdan con las que ofrecen los fabricantes de camiones, a veces demasiado entusiastas. Como es el caso de la empresa pionera Mercedes-Benz que asegura que su tractora eActros 600, con un bloque de baterías que suministran 621 kWh, tiene una autonomía de 500km, lo que supondría utilizar 124,2 kWh para recorrer 100 km. Estos números suponen una gran rebaja a la idea inicial de la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) pero siguen siendo una gran limitación logística y económica a corto-medio plazo el uso de motores eléctricos en el transporte pesado.

Tras conocer esta gran dificultad logística, es necesario el estudio de nuevas alternativas para lograr la descarbonización en el transporte pesado, el cual hemos visto que tiene gran peso en las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero del transporte mundial. Estas nuevas alternativas o soluciones pasan por el estudio, tratamiento y la experimentación de los diferentes combustibles renovables.

2. COMBUSTIBLES DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

2.1. Gas natural

El primer combustible que se utiliza en la actualidad para reducir las emisiones es el gas natural, combustible fósil no derivado del petróleo que procede de pozos como es el caso del gas convencional y de estratos pizarrosos como es el caso del gas no convencional.

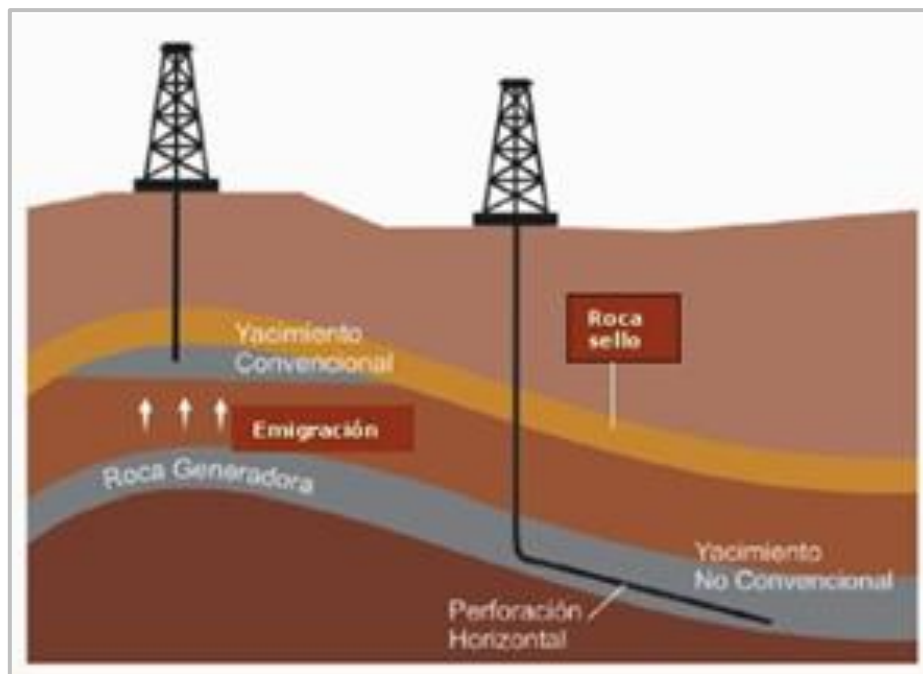


Figura 3. Esquema extracción de gas natural [2]

El gas natural tiene grandes ventajas respecto al combustible convencional. Primeramente, los precios del gas natural son más económicos con respecto a los del petróleo además es una tecnología que ya se utiliza en el presente y puede reducir las emisiones de dióxido de carbono hasta en un 25% así como disminuir

las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas finas, según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable [12].

El gas natural para el uso en el transporte, puede ser de dos tipos: gas natural licuado (GNL) y gas natural comprimido (GNC) [3].

2.1.1. Gas natural licuado (GNL)

Este tipo de gas natural se almacena en forma líquida a muy bajas temperaturas (1 bar, -160°C), lo que permite un mayor almacenamiento energético en un espacio más reducido pudiendo reducir hasta 600 veces su volumen. Este tipo de combustible se utiliza en gran medida en motores *bi-fuel* y puede reducir el ruido del motor hasta en un 50%

El GNL es la variedad de gas natural indicada para el transporte de larga distancia, pues este estado licuado reduce drásticamente su volumen, consiguiendo optimizar el rendimiento de los depósitos. Esto conlleva una gran autonomía de los vehículos que lo utilizan. Un depósito de GNL permite recorrer entre los 800 y los 1.500 kilómetros, distancias ideales para cualquier ruta de mercancías. Por tanto, no es de extrañar que GNL sean ya siglas que suenan muy fuerte en las novedades de los fabricantes de camiones.

2.1.2. Gas natural comprimido (GNC)

Este tipo de gas natural se almacena en forma gaseosa alta presión lo que requiere un espacio almacenamiento mayor en comparación con el gas natural licuado. Aparte de esta desventaja, este tipo de gas natural solo se puede utilizar en motores de ciclo Otto, es decir, solo podría ser utilizado en transporte pesado de corta distancia.

Por sus características, supone la alternativa al combustible cotidiano en las ciudades, ya que cumple con las necesidades energéticas de vehículos ligeros, como furgonetas de reparto, autobuses urbanos, camiones de basura, etc. Es decir, que cubre los desplazamientos urbanos o de media distancia, aunque también sirve para repartos o rutas de mercancía cortas, entre los 300 y 500 kilómetros. Además, es compatible con el gas renovable, con lo que su huella de CO₂ se reduce significativamente si se considera el ciclo de vida.

2.1.3. Situación actual

La situación actual de este tipo de combustible en el ámbito nacional se encuentra en un gran crecimiento.

En el ámbito nacional encontramos [11]:

- Un 23% de las nuevas matriculaciones de autobuses en España en 2022 fueron de GNC, mientras que la cuota matriculaciones de camiones a GNL alcanzó el 4,6%.

- Nuestro país es el tercero de Europa en parque de autobuses a GNC y el primero en parque de camiones.
- España cuenta con 250 puntos de repostaje de GNC/GNL, a los que hay que sumar 30 en proyecto, todas ellos en disposición de suministrar biometano sin tener que hacer ningún tipo de modificación.



Figura 4. Puntos de repostaje en la Península Ibérica [1]

Atendiendo al ámbito internacional vemos que el gas natural alimenta a más de 23 millones de vehículos en todo el mundo.

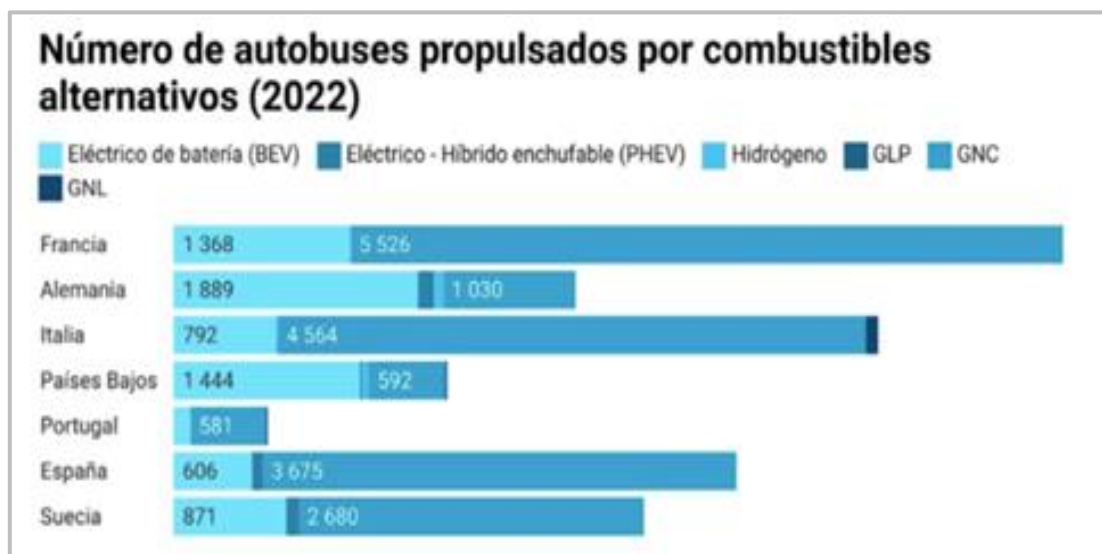


Figura 5. Número de autobuses propulsados por combustibles alternativos [7]

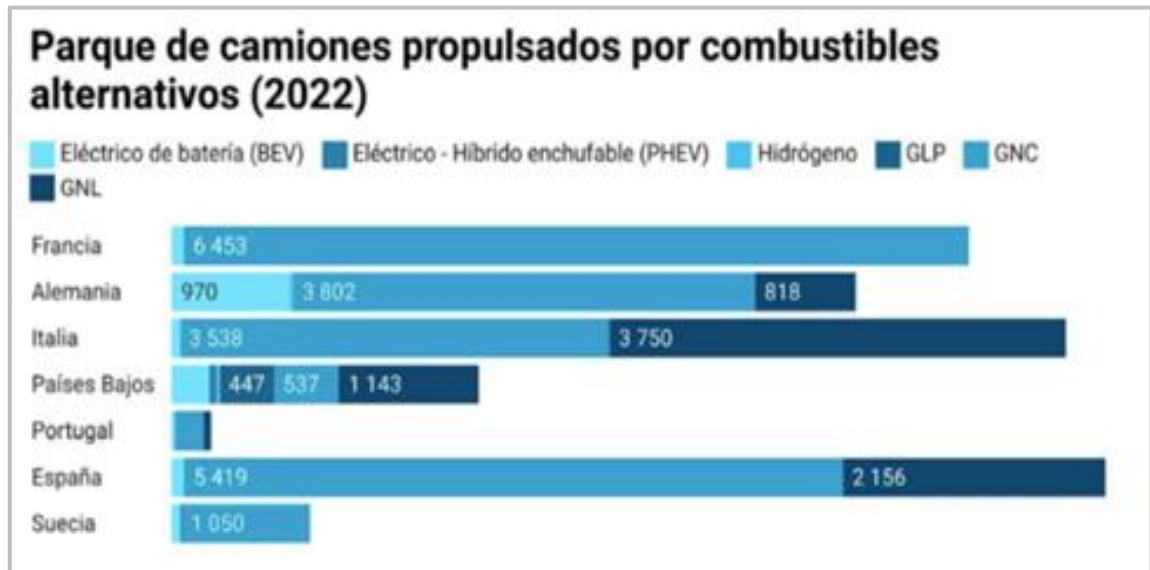


Figura 6. Número de camiones propulsados por combustibles alternativos [7]

2.2. Gas licuado del petróleo (GLP)

Es una mezcla de gas butano en un 40% y propano en un 60%. Su autonomía puede llegar a los 1.200 kilómetros si se combina con un depósito de gasolina y el ahorro frente a los combustibles tradicionales puede alcanzar el 40%, mientras que es también la mitad de ruidoso que los vehículos a gasolina o diésel.

Aunque no es tan limpio como el gas natural, cuenta con la gran ventaja de ser el combustible ecológico más usado en el mundo, en unos 25 millones de vehículos, casi la mitad de ellos en Europa. Incluso en España, donde su implantación no es significativa, cuenta con una red de 800 estaciones de servicio que permiten el repostaje de GLP. Un número abultado frente a la incipiente, aunque exponencial presencia de estaciones de gas natural (125 en este momento).

Las ventajas más destacables de este tipo de combustible es la amplia red de suministro que tiene el gran poder calorífico inferior que tiene en comparación con la gasolina del gasoil el alto número de octano y que emite menores emisiones de CO₂ [3].

Además, al tener un motor de autogás, obtienes la etiqueta medioambiental ECO abriendo así la posibilidad de no tener limitaciones de movimiento con dicho vehículo. Sólo en 2023 hubo 100.000 transformaciones a motores que usan GLP. Según datos de la empresa Eco-Moving, estas transformaciones suponen un coste de 1.200 - 3.500€ y aseguran que al recorrer 10.000kms podemos amortizar el 70% del coste.

2.2.1. Situación actual

La situación actual de este combustible de transición energética es de un gran crecimiento y si nos fijamos en los datos, encontramos:

- 25 millones de vehículos, casi la mitad de ellos en Europa.

- En España, donde su implantación no es significativa, cuenta con una red de 600 estaciones de servicio que permiten el repostaje de GLP.
- Un número abultado frente a la incipiente, aunque exponencial presencia de estaciones de gas natural (125 en este momento).

3. COMBUSTIBLES RENOVABLES NEUTROS EN CARBONO

Estos nuevos combustibles que aplica en nuestro libro a diferencia del gas natural son neutros en carbono, estos combustibles son conocidos mundialmente como biocombustibles. Estos biocombustibles se pueden clasificar según distintas generaciones.

3.1. Biocombustibles de primera generación

Estos biocombustibles surgen a partir de cultivos agrícolas los cuales tiene interferencia con la alimentación humana siendo esta una de las grandes desventajas o limitación de su uso.

3.1.1. Bioetanol

Este tipo de biocombustible se obtiene a partir de biomasa azucarada amilácea o lignocelulósica que, tras una etapa de pretratamiento, fermentación y destilación se obtiene el biocombustible.

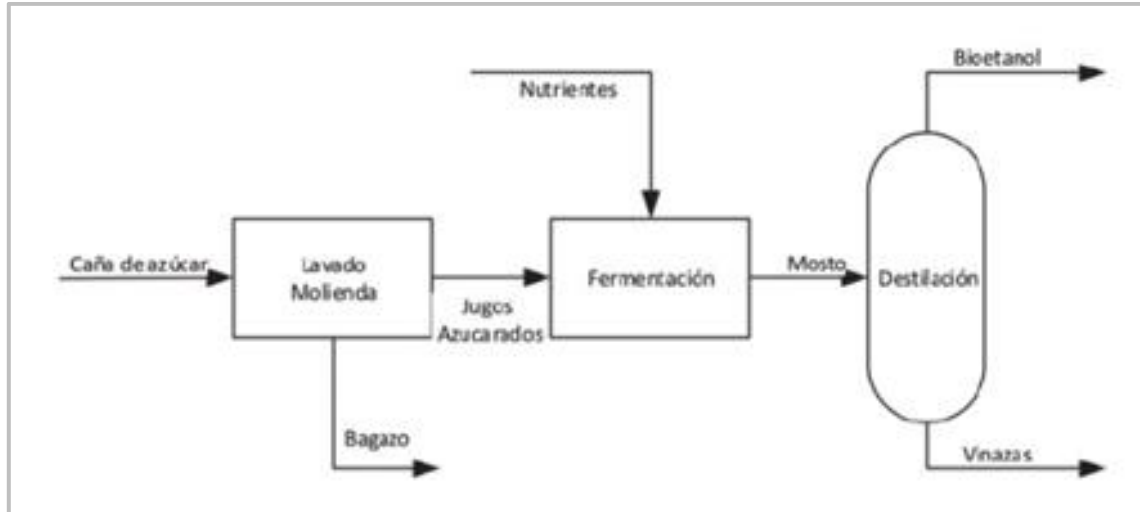


Figura 7. Esquema simplificado de obtención de bioetanol [17]

Tiene capacidad de sustituir a la gasolina en motores de ciclo Otto y, en la actualidad, se usa en un porcentaje del combustible total que se inyecta en los automóviles.

Como experiencias de uso de este biocombustible, sabemos que se utilizó en su totalidad en el pasado en Brasil a partir de caña de azúcar viendo que al paso de los años este combustible generaba daños en las juntas de los motores, por incompatibilidades de los materiales antiguos reduciendo así su vida útil. Per la

tecnología flex-fuel ha resuelto gran parte del problema. Hoy en día, tras la resolución del Real Decreto 376/2022 (2022) [8], se utiliza un <12% de este biocombustible en el carburante convencional, aumentado su uso hasta un 15% en los próximos dos años.

3.1.2. Biodiésel (FAME)

Este tipo de biocombustible se obtiene a partir de materia prima vegetal y animal, cuyo proceso de producción se puede apreciar en la figura siguiente:

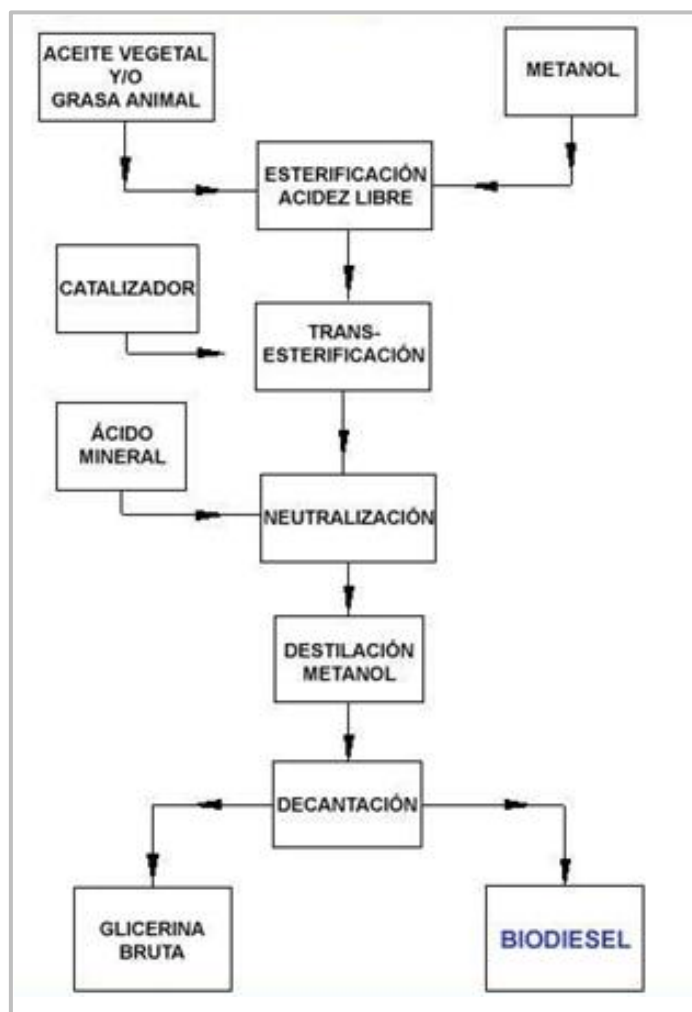


Figura 8. Esquema de obtención de biodiésel [15]

Este combustible puede sustituir al gasóleo, es decir, está enfocado para motores diésel y en la actualidad un porcentaje del combustible convencional es biodiésel. Esta limitación se debe a que este combustible es viscoso y si las mezclas son mayores del 30% de este combustible puede dar lugar a problemas de corrosión en el motor (dependiendo de materiales y calidad del biodiésel entre otros factores). Actualmente debe mezclarse un 7,5% de Biodiésel con gasoil. La Ley Ómnibus propone un 10% desde su entrada en vigor y subidas periódicas hasta alcanzar el 12,5% a principios de 2026.

3.2. Biocombustibles de segunda generación

Estos biocombustibles se originan a partir de biomasa residual (residuos orgánicos y biomasa lignocelulosa), por lo tanto, no tiene interacción con la alimentación humana.

3.2.1. Bio-GLP

El bio GLP tienen las mismas propiedades que el gas licuado del petróleo, pero su producción se debe a un 60% de residuos y desechos y un 40% de aceites vegetales. Este biocombustible se obtiene a través del siguiente proceso:

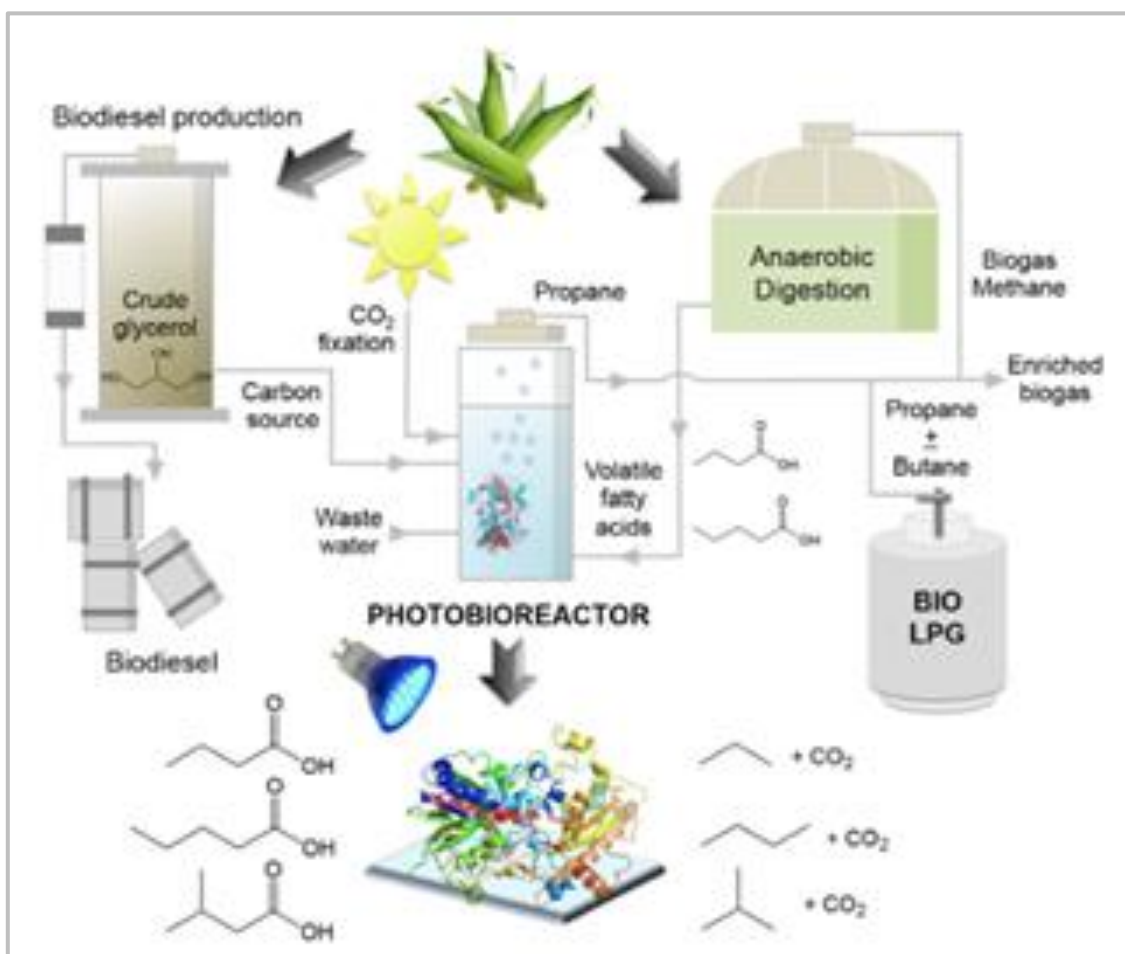


Figura 9. Esquema de obtención de bio-GLP [10]

Según datos de la empresa Primagás en 2021, este biocombustible 2ª generación es capaz de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 90% en comparación con gases licuados convencionales y reducen un 95% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a combustibles fósiles. Esto hace que sea una gran alternativa para la descarbonización del transporte pesado, aunque se ha experimentado poco con este combustible, teniendo una situación de incertidumbre ante el posible éxito de esta alternativa [10].

3.2.2. HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)

Este biocombustible, a diferencia de los biocombustibles de primera generación, se obtiene a partir de aceites vegetales y grasas animales tras un proceso de hidrotratamiento e isomerización.

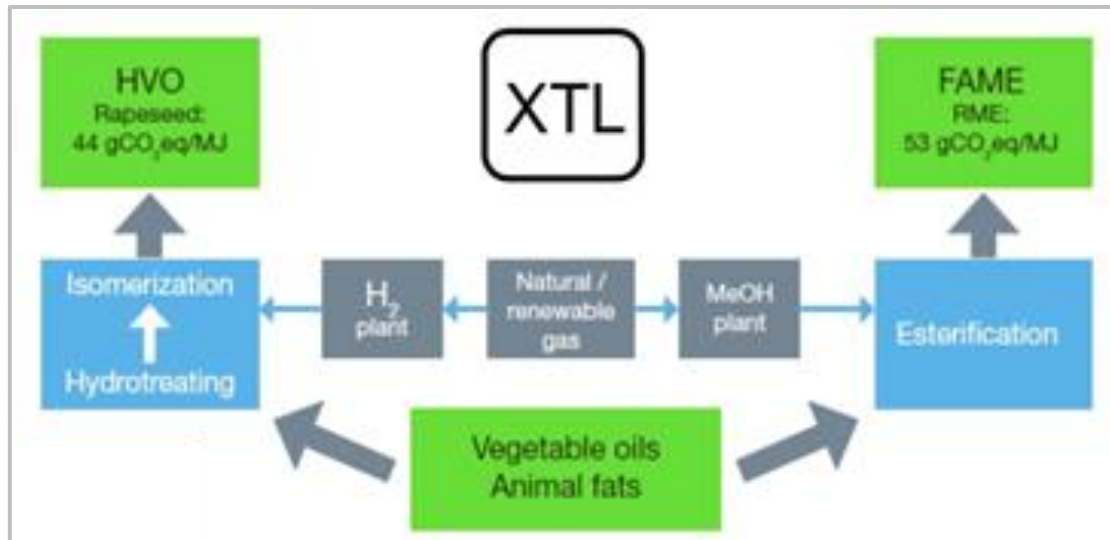


Figura 10. Esquema de obtención de HVO [4]

Este biocombustible tiene mayor número de cetano y por tanto mejores propiedades para conseguir una combustión más eficiente. Se puede utilizar en motores diésel prácticamente sin modificaciones, al ser éste un combustible con mejor densidad que el diésel convencional.

Entre las ventajas más destacables de este biocombustible de segunda generación, encontramos:

- El HVO no incluye azufre ni oxígeno por lo que, al quemarse en un motor diésel, se produce una importante reducción de emisiones de monóxido de carbono, NOx de hasta el 90% menos que en un diésel convencional (y entre un 70 y un 95% de reducción de emisiones de CO₂), sin ser necesario realizar modificaciones en el motor para su uso. Estos porcentajes dependen de: Condiciones del ensayo, Tipo de motor y Mezcla utilizada (E10, E20, E85, etc.).
- Con HVO el arranque en frío es mucho más fluido gracias a las grasas de origen animal que contiene.
- El HVO colabora muy directamente en un mejor mantenimiento de los vehículos ya que la concentración de cenizas en sus gases de escape es mucho más reducida y, en consecuencia, ensucia menos los componentes mecánicos del motor.

En cuanto a su utilización en la actualidad, el HVO se viene utilizando en el transporte terrestre, marítimo y aéreo, siendo Mercedes-Benz, Scania y Volvo los fabricantes pioneros en su utilización.

Por su parte Toyota ya ha comunicado oficialmente que sus motores aceptan combustible HVO (los Toyota *Land Cruiser* y Toyota *Hilux* tendrán una versión que utilizará diésel renovable en 2023), al igual que *Stellantis* en sus mecánicas *BlueHDi* para todas sus marcas procedentes del grupo PSA (Opel, DS, Peugeot y Citroën), y por su parte Ford está probando también en sus motores EcoBlue de 2.0 litros (en los *Transit*) y Audi ha homologado ya su motor V6 TDI con funcionamiento normalizado con HVO [13].

3.2.3. Biometano

Este biocombustible se obtiene tras un post tratamiento del biogás y se utiliza en motores a gas. El proceso de producción de biometano es el siguiente:

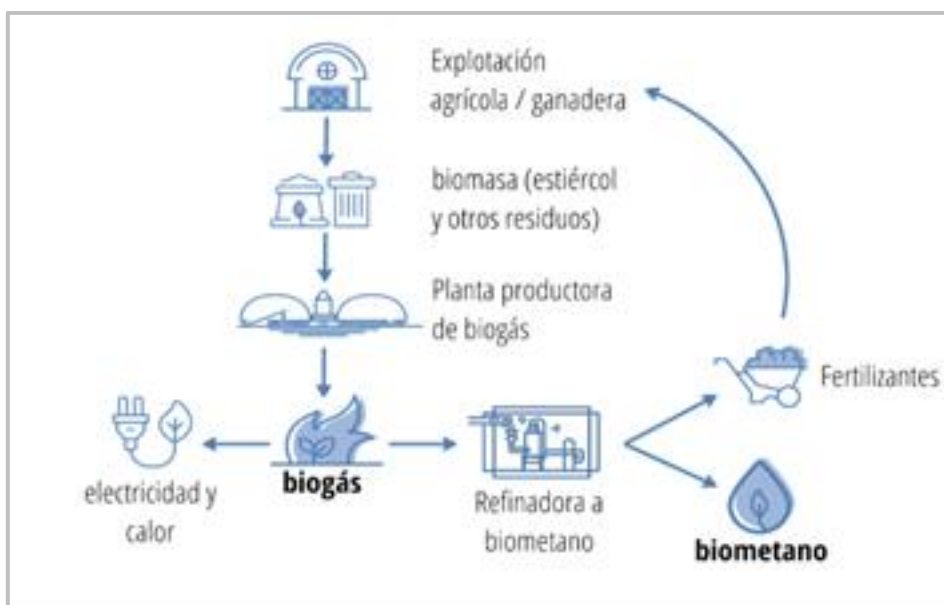


Figura 11. Esquema de obtención de biometano [5]

El biometano tiene la capacidad de reducir el CO₂ hasta en un 90% desde la perspectiva del “Well-To-Wheel” (pozo a la rueda). La combinación de motores potentes y soluciones de tanques que proporcionan autonomías más largas que nunca (tanto en tanques bio-GNC como bio-GNL) brindan a todo tipo de transportistas la oportunidad de elegir soluciones de camiones basadas en el biometano.

Como hemos comentado anteriormente, un 23% de las nuevas matriculaciones de autobuses en España en 2022 fueron de GNC, mientras que la cuota matriculaciones de camiones a GNL alcanzó el 4,6%.

Nuestro país es el tercero de Europa en parque de autobuses a GNC y el primero en parque de camiones. Sin embargo, y a pesar de que estos vehículos ya pueden moverse con biometano sin realizar ningún tipo de modificación, menos del 1% del gas consumido en el transporte en 2022 fue de origen renovable. Se trata de una situación muy diferente a la que se vive en otros países de nuestro entorno, donde la cuota de biometano en transporte llega hasta el 95% en Suecia o el 90% en Alemania.

España cuenta con 250 puntos de repostaje de GNC/GNL, a los que hay que sumar 30 en proyecto, todas ellos en disposición de suministrar biometano sin tener que hacer ningún tipo de modificación.



Figura 12. Capacidad de producción de biometano y nº de plantas en explotación en Europa en 2021 [7]

En el futuro, se prevé un incremento exponencial de la producción de biometano, que podría multiplicarse por 10 en España entre 2022 y 2025.

A pesar del papel determinante que el biometano puede jugar en la descarbonización del transporte, en España sólo hay 8 plantas de producción (349 GWh/año) y 13 plantas piloto (22.86 GWh/año), destinándose menos del 4% de esa capacidad de producción al transporte en 2022. Siete de las plantas comerciales inyectan el biometano en la red de gas natural, mientras que las plantas piloto se enfocan a producir biometano para su uso directo en vehículos [11].

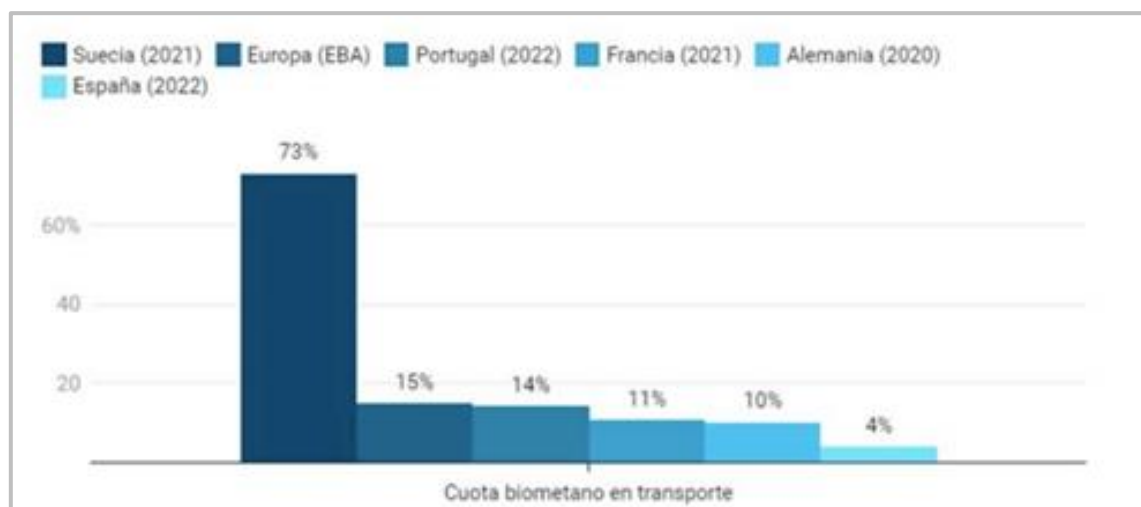


Figura 13. Biometano destinado al transporte respecto al total producido [7]

En España destaca la reciente incorporación de autobuses EMT llamados “Línea Cero” de la Comunidad de Madrid, los cuales son propulsados únicamente por este tipo de biocombustible generado en la planta de Valdemingómez (Madrid).

Aunque todo puedan parecer ventajas, cabe comentar que hay una gran dificultad logística de almacenaje debido a la ocupación y las condiciones óptimas en las que se debe almacenar este combustible además al ser captados en vertederos pueden tener siloxanos que al entrar al motor y calentarse generen piedras las cuales producirán daños en el motor.

4. COMBUSTIBLES RENOVABLES DE DESCARBONIZACIÓN

4.1. E-Fuels / Combustibles sintéticos

Estos combustibles se obtienen a partir de cultivos de captación y almacenamiento de CO_2 , también pueden ser denotados como biocombustibles de cuarta generación. Hay distintos tipos según cómo se obtengan: e-GLP, e-Metano, e-Diésel y e-Gasolina

El proceso obtención de estos combustibles es el siguiente:

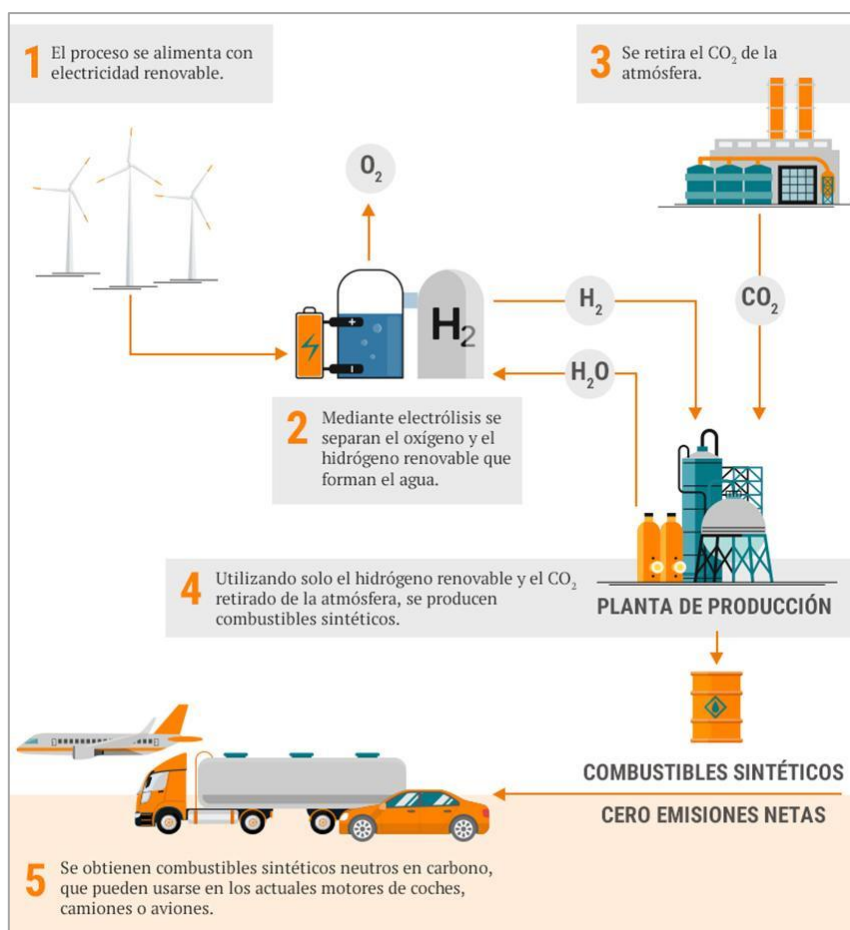


Figura 14. Esquema de obtención de e-fuels y biocombustibles de cuarta generación. (Fuente: ChatGPT a partir de esquemas de producción de combustibles sintéticos y captura de CO_2 .)

Las propiedades son similares a los biocombustibles de 2ª generación, con la única diferencia es que la generación se hace a través de captura de CO₂ y de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables siendo así un proceso de potencial neutralidad climática en análisis de ciclo de vida.

Las ventajas de estos biocombustibles es que puede llegar a ser incluso negativo en emisiones de carbono y que tienen compatibilidad con vehículos de combustión actuales, además de las propias ventajas que tiene los biocombustibles de 2ª generación.

Aun así existen desventajas ya que esta tecnología se está utilizando en muy pequeña escala únicamente en contados camiones de diferentes empresas (cómo es el caso de la empresa BeGas Motor que está comenzando a utilizar e-GLP en motores de sus camiones), Stellantis está lleva probando años estos combustibles sintéticos en 28 familias de MCIAs y Repsol ha creado la primera planta de producción de *e-fuels* en España con una capacidad de producción de 8.000 l/día de combustible para su uso a finales de 2024, lo cual genera la necesidad de crear una infraestructura para que la logística y el uso de este combustible sea exitosa ya que requieren de gran intensidad de energía en su producción [16].

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este informe se pueden resumir en las siguientes:

- La descarbonización al 2050 es obligatoria (Normativa UE)
- El GN y GLP son una buena solución de transición energética hacia la descarbonización, porque permite la rápida introducción del uso de *bio-fuels* y *e-fuels*.
- El uso de biocombustibles de 1ª generación será minoritario.
- Los *e-fuels* se postulan como una de las mejores alternativas de combustibles del futuro para conseguir la descarbonización total en el transporte pesado.
- La descarbonización con el uso de *e-fuels* en gran medida depende de la producción de H₂ de origen renovable.

6. AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos profesores que me han guiado en la elaboración de este trabajo, así como en su ayuda para aumentar el conocimiento personal en esta materia con tanta importancia tanto en el presente como futuro. En especial, agradecer el trabajo y ayuda de las profesoras Blanca del Valle Arenas Ramírez y Natalia Fonseca.

7. REFERENCIAS

- [1] ABC motor. (2017). *Estas son las gasolineras donde puedes repostar gas en España*. https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-estas-gasolineras-donde-puedes-repostar-espana-201702271931_noticia.html
- [2] Andreotti, J. I. (2014). *Origen del Shale Gas*. https://ingenieroandreotti.blogspot.com/2014_07_21_archive.html
- [3] Bilogistik S.A. (2018). *GNL, GNC y GLP: transporte por carretera a todo gas*. Obtenido de: <https://www.bilogistik.com/blog/gnl-gnc-glp-transporte-carretera/>
- [4] BioRefineries Blog. (2019). *Hidrotratamiento (HVO) – Ventajas sobre el biodiesel convencional y propiedades*. <https://biorrefineria.blogspot.com/2019/11/hidrotratamiento-hvo-diesel-renovable-ventajas-sobre-el-biodiesel-convencional-propiedades.html?>
- [5] Campus 4.0 New Holland (2023). *¿De dónde se obtiene el Biometano?* <https://campusnewholland.es/agroconsejo/de-donde-se-obtiene-el-biometano/>
- [6] Cebrian, J. M. (2024). *Así son las baterías de los camiones eléctricos*. Transporte Profesional. <https://transporteprofesional.es/industria-auxiliar/componentes-recambios-camion/asi-son-las-baterias-de-los-camiones-electricos-202404021346>.
- [7] Cossent Arín, R., Linares Llamas, P., Pérez Bravo, M. y Serna Zuluaga, S. (2023). Informe anual. *La descarbonización del transporte pesado en España y Portugal*. Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas (ICAI-ICADE). https://gasnam.es/wp-content/uploads/2023/06/202306_Informe_Descarbonizacion-de-transporte-pesado-en-Espana-y-Portugal-1.pdf
- [8] España. *Real Decreto 376/2022, de 17 de mayo, por el que se regulan los criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa, así como el sistema de garantías de origen de los gases renovables*. Boletín Oficial del Estado, núm. 118, de 18 de mayo de 2022, páginas 68400 a 68507. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2022-8121
- [9] European Environment Agency. (2019). *Contribution of the transport sector to total emissions of the main air pollutants*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/contribution-of-the-transport-sector-6?activeTab=6fbd444d-c422-4a78-8492-fd496bd61b7a>
- [10] Frey, R. (2024). *Origen, Evolución y Futuro del Bio GLP*. <https://www.glpautogas.info/es/que-es-el-bio-glp.html>

-
- [11] Gasnam-Neutral Transport. (2023). *El uso del biometano, hidrógeno y gas natural en el transporte pesado ha evitado la emisión de 500.000 toneladas de CO₂ en España y Portugal en 2022*. Nota de prensa. <https://gasnam.es/nota-de-prensa-uso-biometano-hidrogeno-gas-natural-transporte-pesado-ha-evitado-emision-500-000-toneladas-co2-espana-portugal-2022/>
 - [12] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). <https://www.irena.org/>
 - [13] Motor Mundial. (2023). HVO: todo lo que debes saber. Motor Mundial, 3.
 - [14] Parlamento Europeo. (2019). Emisiones de CO₂ de los coches: hechos y cifras (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
 - [15] PBWorks (s.f.). Proc_Biodiesel_C07. http://quiorgiti.pbworks.com/w/page/14949473/Proc_Biodiesel_C07
 - [16] Transición Energética. (2023). Los e-fuel. Obtenido de: <https://www.transicionenergetica.es/movilidad-sostenible/e-fuel/>
 - [17] Vargas-Barbosa, J. M. & Giraldo-García, J. A. (2015). Modelo de entrenamiento en toma de decisiones relacionadas con gestión de producción y operaciones de un sistema de fabricación de bioetanol. ITECKNE Innovación e Investigación en Ingeniería, 12(1):7-16, DOI: 10.15332/iteckne.v12i1.816. https://www.researchgate.net/publication/281208241_Modelo_de_entrenamiento_en_toma_de_decisiones_relacionadas_con_gestion_de_produccion_y_operaciones_de_un_sistema_de_fabricacion_de_bioetanol

5. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte pesado de mercancías

Eduardo Moya García

ABSTRACT

Hydrogen presents itself as a sustainable and efficient alternative to oil in the transportation of goods. Its adoption involves a series of challenges, from technological innovation to supply chain and regulations. Hydrogen vehicles, which include fuel cell and hydrogen combustion types, are an integral part of this transition.

There are real experiences and case studies that demonstrate the benefits and challenges of their use. The economy of hydrogen is a crucial aspect, with associated costs, profitability analysis, and government incentives playing a significant role.

Looking to the future, recent and developing innovations promise to improve the efficiency and adoption of hydrogen vehicles in goods transportation. Despite the challenges, hydrogen has great potential to transform goods transportation and contribute to a more sustainable future.

Keywords: hydrogen, goods transportation, hydrogen vehicles, innovation, profitability

RESUMEN

El hidrógeno se presenta como una alternativa sostenible y eficiente al petróleo en el transporte de mercancías. Su adopción implica una serie de desafíos, desde la innovación tecnológica hasta la cadena de suministro y las regulaciones. Los vehículos de hidrógeno, que incluyen los de pila de combustible y los de combustión de hidrógeno, son una parte integral de esta transición.

Existen experiencias reales y casos de estudio que demuestran los beneficios y desafíos de su uso. La economía del hidrógeno es un aspecto crucial, con costos asociados, análisis de rentabilidad e incentivos gubernamentales que juegan un papel importante.

Mirando hacia el futuro, las innovaciones recientes y en desarrollo prometen mejorar la eficiencia y la adopción de los vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías. A pesar de los desafíos, el hidrógeno tiene un gran potencial para transformar el transporte de mercancías y contribuir a un futuro más sostenible.

Palabras clave: hidrógeno, transporte de mercancías, vehículos de hidrógeno, innovación, rentabilidad

1. INTRODUCCIÓN

El transporte de mercancías es un componente esencial de la economía global. Se trata de un sector diverso y multifacético que abarca una variedad de modos de transporte, cada uno con sus propias características únicas, ventajas y desafíos.

Comenzando con el transporte por carretera, los camiones son uno de los medios más comunes para el transporte de mercancías. Ofrecen flexibilidad en términos de rutas y horarios, y son especialmente eficaces para las entregas de “puerta a puerta” y son responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector del transporte.

En cuanto al transporte ferroviario, los trenes son una opción eficiente para el transporte de grandes volúmenes de mercancías a largas distancias. Aunque su flexibilidad es menor en comparación con los camiones, su mayor capacidad y eficiencia energética los hacen atractivos para ciertos tipos de transporte de mercancías.

El transporte marítimo es el medio de transporte dominante para el comercio internacional, transportando la mayor parte del volumen total de mercancías. Aunque son relativamente lentos, ofrecen una gran capacidad y son más eficientes en términos de emisiones por tonelada de mercancías transportadas.

Finalmente, el transporte aéreo se utiliza principalmente para mercancías de alto valor o que requieren entrega rápida. Aunque el transporte aéreo es el más rápido, también es el más costoso y el que más emisiones produce por tonelada de mercancías.

1.1. Dependencia del petróleo

El transporte de mercancías, como muchos otros sectores industriales, ha dependido históricamente del petróleo como su principal fuente de energía. Esta dependencia tiene varias implicaciones importantes que vale la pena explorar.

En primer lugar, el costo del petróleo es un factor significativo en la economía del transporte de mercancías. Los precios del petróleo son volátiles y pueden fluctuar debido a una variedad de factores, incluyendo la geopolítica, la oferta y la demanda, y las condiciones del mercado. Estas fluctuaciones pueden tener un impacto directo en los costos operativos de las empresas de transporte de mercancías.

Además, los vehículos que funcionan con petróleo emiten gases de efecto invernadero, lo que contribuye al cambio climático. El sector del transporte es responsable de una parte significativa de estas emisiones. De hecho, el transporte de pasajeros y mercancías representa actualmente alrededor de una cuarta parte de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía y se espera que aumente hasta el 30% en 2050 [1]. La transición a fuentes de energía más limpias, como el hidrógeno, puede ayudar a reducir estas emisiones.

La dependencia del petróleo también plantea problemas de seguridad energética. Muchos países dependen de las importaciones de petróleo, lo que puede hacerlos vulnerables a las interrupciones del suministro.

A pesar de esta dependencia histórica del petróleo, el sector del transporte de mercancías está en medio de una transición energética. Hay un creciente interés en las alternativas al petróleo, incluyendo los vehículos eléctricos y de hidrógeno. Estas tecnologías tienen el potencial de reducir la dependencia del sector del transporte de mercancías del petróleo, con beneficios tanto para el medio ambiente como para la economía.

Según las estimaciones para el año 2040, se prevé que se consuman aproximadamente 47,3 millones de barriles de petróleo diarios en el sector del transporte por carretera. Sin embargo, se espera que la demanda de petróleo en el sector del transporte se reduzca a la mitad para 2050 [1].

1.2. Impacto Ambiental

El transporte de mercancías es un sector vital para la economía global, pero también es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, que se utiliza para alimentar los vehículos de transporte.

El transporte de mercancías por carretera, por ejemplo, representa el 4,5% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad humana en la Unión Europea. Estos gases incluyen el dióxido de carbono (CO₂), que representa el 80%, el dióxido de nitrógeno (NO₂), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) [2].

Las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de mercancías contribuyen al cambio climático, un problema global que tiene implicaciones de gran alcance para el medio ambiente y la vida humana. El cambio climático puede provocar un aumento de las temperaturas globales, cambios en los patrones climáticos, la subida del nivel del mar y la pérdida de biodiversidad.

Además, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) estimaba en 2018 que el movimiento de mercancías genera el 8% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, y hasta el 11% si se incluyen los producidos en almacenes y puertos. Si no se toman medidas, el transporte de mercancías se convertirá en el sector más contaminante en 2050 [3].

Según los informes más recientes disponibles, las emisiones brutas de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel nacional en España se estimaron para el año 2022 en 294,2 millones de toneladas de CO₂-eq. Esto supone un aumento de las emisiones del 2% respecto al año anterior. El nivel de emisiones brutas se sitúa en un +2,4% respecto a 1990 y un -32,8% respecto a 2005 [4].

Además, según el Instituto Nacional de Estadística de España, la economía española emitió 304,4 millones de toneladas de gases de efecto invernadero en

2022, un 3,1% más que en 2021. Estas emisiones han disminuido un 26,9% desde 2008. El 22,7% de las emisiones correspondieron a los hogares [5].

Además de las emisiones de gases de efecto invernadero, el transporte de mercancías también puede tener un impacto en la calidad del aire. Los vehículos de transporte emiten contaminantes atmosféricos, como el óxido de nitrógeno y las partículas finas, que pueden tener efectos nocivos en la salud humana. Estos contaminantes pueden causar o agravar una serie de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

El impacto ambiental del transporte de mercancías no se limita a las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire. El transporte de mercancías también puede tener un impacto en el uso del suelo, ya que las infraestructuras de transporte, como las carreteras y los puertos, pueden requerir grandes extensiones de tierra. Además, el ruido y las vibraciones del transporte de mercancías pueden tener un impacto en la calidad de vida de las personas que viven cerca de las rutas de transporte.

1.3. Innovación tecnológica

La innovación tecnológica está transformando rápidamente el sector del transporte de mercancías. Según un informe de Sertrans, el sector está evolucionando a pasos agigantados, impulsado por avances tecnológicos y cambios en la demanda del mercado. En 2024, se espera una mayor adopción de sistemas de gestión logística inteligente, que utilizan inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático para optimizar rutas, prever demandas y mejorar la eficiencia operativa [6].

Uno de los desarrollos más significativos ha sido la introducción de vehículos de hidrógeno. Estos vehículos utilizan células de combustible de hidrógeno para generar electricidad, lo que los hace más eficientes y sostenibles que los vehículos tradicionales de combustión interna. Además, los vehículos de hidrógeno no emiten gases de efecto invernadero durante su operación, lo que puede ayudar a reducir las emisiones del sector del transporte de mercancías.

Además de los vehículos de hidrógeno, también se están viendo innovaciones en áreas como la logística y la gestión de la cadena de suministro. Las tecnologías de la información y la comunicación están permitiendo una mayor eficiencia y transparencia en la gestión de la cadena de suministro, lo que puede resultar en ahorros de costos y una mayor satisfacción del cliente [6].

La automatización y la robótica también están desempeñando un papel cada vez más importante en el transporte de mercancías. Desde drones para la entrega de paquetes hasta camiones autónomos para el transporte de mercancías a larga distancia, estas tecnologías tienen el potencial de mejorar la eficiencia y la seguridad del transporte de mercancías.

Finalmente, la digitalización y el uso de grandes datos están permitiendo una mejor planificación y optimización del transporte de mercancías. Al recopilar y analizar grandes cantidades de datos, las empresas pueden tomar decisiones más informadas y mejorar la eficiencia de sus operaciones.

1.4. Regulaciones y Políticas

Las regulaciones y políticas gubernamentales juegan un papel crucial en la configuración del sector del transporte de mercancías. Estas pueden influir en una amplia gama de aspectos, desde las emisiones de gases de efecto invernadero hasta la seguridad en el transporte.

En muchos países, existen regulaciones estrictas diseñadas para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de mercancías. Estas regulaciones pueden incluir límites de emisiones, normas de eficiencia de combustible y requisitos para el uso de tecnologías limpias. Estas políticas pueden incentivar la adopción de vehículos de hidrógeno y otras tecnologías de transporte limpio.

Además de las regulaciones sobre emisiones, también existen políticas que se centran en la seguridad del transporte de mercancías. Estas pueden incluir normas sobre el mantenimiento de los vehículos, los tiempos de conducción y descanso de los conductores, y los procedimientos para el transporte de mercancías peligrosas. Estas regulaciones son esenciales para proteger la seguridad de los conductores y del público en general.

Las políticas gubernamentales también pueden influir en la economía del transporte de mercancías. Por ejemplo, los impuestos sobre los combustibles fósiles, los subsidios para las tecnologías limpias y las tarifas de peaje pueden afectar la rentabilidad de diferentes modos de transporte de mercancías. Estas políticas pueden influir en las decisiones de las empresas sobre qué tecnologías de transporte adoptar.

Finalmente, las regulaciones y políticas también pueden influir en la innovación en el sector del transporte de mercancías. Las políticas que apoyan la investigación y el desarrollo pueden ayudar a impulsar la innovación en tecnologías de transporte limpio, incluyendo los vehículos de hidrógeno.

1.5. Desafíos de la Cadena de Suministro

La cadena de suministro en el sector del transporte de mercancías enfrenta una serie de desafíos que son cruciales para su eficiencia y sostenibilidad. Estos desafíos abarcan desde la logística y la infraestructura hasta la tecnología y las regulaciones.

Uno de los principales desafíos es la logística. La gestión eficiente de la logística es fundamental para garantizar que las mercancías se muevan de manera eficiente y rentable. La logística puede ser compleja y desafiante, especialmente cuando se trata de transportar mercancías a través de fronteras internacionales o a lugares remotos.

La infraestructura es otro desafío importante. El transporte de mercancías requiere una infraestructura robusta, que incluye carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos. Sin embargo, en muchas partes del mundo, la infraestructura de

transporte es insuficiente o está en mal estado. Esto puede resultar en retrasos y aumentar los costos de transporte.

La tecnología también presenta desafíos. Aunque la tecnología tiene el potencial de mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del transporte de mercancías, su adopción puede ser costosa y compleja. Además, la rápida evolución de la tecnología puede hacer que sea difícil para las empresas mantenerse al día con las últimas innovaciones.

Finalmente, las regulaciones pueden presentar desafíos. Las empresas de transporte de mercancías deben cumplir con una variedad de regulaciones, que pueden variar de un país a otro. Estas regulaciones pueden incluir normas de seguridad, regulaciones ambientales y requisitos aduaneros. Navegar por estas regulaciones puede ser complicado y requerir un considerable tiempo y recursos.

Según un informe de WTW, el 65% de las empresas consultadas ha sufrido pérdidas relacionadas con la cadena de suministro más altas de lo esperado. Aun así, la gran parte de estas pérdidas no son a largo plazo. Un 65% de las organizaciones ha tomado acciones para reforzar la resiliencia de sus cadenas de suministro tras el impacto de la pandemia. Una de cada dos ha apostado por trabajar más de cerca con sus proveedores. La baja calidad de los datos y la falta de transparencia son los principales obstáculos que las empresas encuentran a la hora de analizar en profundidad los riesgos de su cadena de suministro [7].

1.6. Importancia del hidrógeno en el transporte de mercancías

El hidrógeno, como fuente de energía alternativa, está ganando terreno en el sector del transporte de mercancías, y su importancia no puede ser subestimada. Este elemento químico, el más ligero y abundante en el universo, tiene el potencial de revolucionar la forma en que transportamos bienes, abordando algunos de los desafíos más apremiantes que enfrenta este sector.

En primer lugar, el hidrógeno puede ser un catalizador para la diversificación energética en el transporte de mercancías. A diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno puede ser producido a partir de una variedad de fuentes, incluyendo el agua, los biocombustibles y el gas natural. Esta diversidad de fuentes puede ayudar a reducir la dependencia del sector del petróleo, proporcionando una mayor estabilidad y resiliencia frente a las fluctuaciones de los precios del petróleo.

Además, el hidrógeno puede jugar un papel crucial en la lucha contra el cambio climático. Los vehículos de hidrógeno no emiten gases de efecto invernadero durante su operación, lo que puede ayudar a reducir la huella de carbono del transporte de mercancías. Esto es especialmente relevante en un momento en que las emisiones del transporte están bajo un escrutinio cada vez mayor.

El hidrógeno también puede contribuir a mejorar la eficiencia energética en el transporte de mercancías. Los vehículos de hidrógeno tienen una mayor eficiencia energética que los vehículos de combustión interna, lo que puede resultar en ahorros de costos a largo plazo. Además, el hidrógeno puede ser almacenado y

transportado con relativa facilidad, lo que puede facilitar su adopción en áreas remotas o de difícil acceso.

Por último, el hidrógeno puede ser un motor de innovación en el sector del transporte de mercancías. La adopción de vehículos de hidrógeno puede estimular el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones, desde sistemas de almacenamiento de energía hasta infraestructuras de recarga de hidrógeno.

2. TECNOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO

2.1. Principios básicos de la tecnología de hidrógeno

La tecnología de hidrógeno, un campo en constante evolución tiene el potencial de transformar la forma en que se genera y utiliza la energía. En el contexto del transporte de mercancías, esta tecnología presenta una serie de características únicas que la hacen especialmente relevante.

En primer lugar, se encuentra la producción de hidrógeno. Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, no se encuentra libremente en la naturaleza. Por lo tanto, debe ser producido a partir de diversas fuentes de energía, incluyendo los combustibles fósiles, la biomasa y el agua. Los métodos más comunes de producción de hidrógeno incluyen la reforma de vapor de gas natural, la gasificación de biomasa y la electrólisis del agua. Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del método de producción puede tener un impacto significativo en la eficiencia y la sostenibilidad de la tecnología de hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno es otro aspecto crucial de la tecnología de hidrógeno. Una vez producido, el hidrógeno debe ser almacenado para su uso posterior. El hidrógeno puede ser almacenado en forma gaseosa, líquida o sólida. Cada método de almacenamiento tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de densidad de energía, seguridad y costos. La elección del método de almacenamiento puede influir en la eficiencia y la practicidad de los vehículos de hidrógeno.

La conversión de hidrógeno en energía se realiza a través de una célula de combustible. En una célula de combustible, el hidrógeno se combina con el oxígeno del aire para producir electricidad, con el agua como único subproducto. Las células de combustible de hidrógeno son eficientes y no emiten gases de efecto invernadero, lo que las hace una opción atractiva para el transporte de mercancías.

Finalmente, las aplicaciones de la tecnología de hidrógeno son diversas y en constante expansión. En el sector del transporte, los vehículos de hidrógeno pueden ofrecer una alternativa sostenible a los vehículos de combustión interna. Además, el hidrógeno puede ser utilizado para almacenar energía renovable, proporcionando una solución para el desafío de la variabilidad de las fuentes de energía renovable.

2.2. Componentes de un vehículo de hidrógeno

Los vehículos de hidrógeno son una alternativa cada vez más interesante en el mundo del transporte.

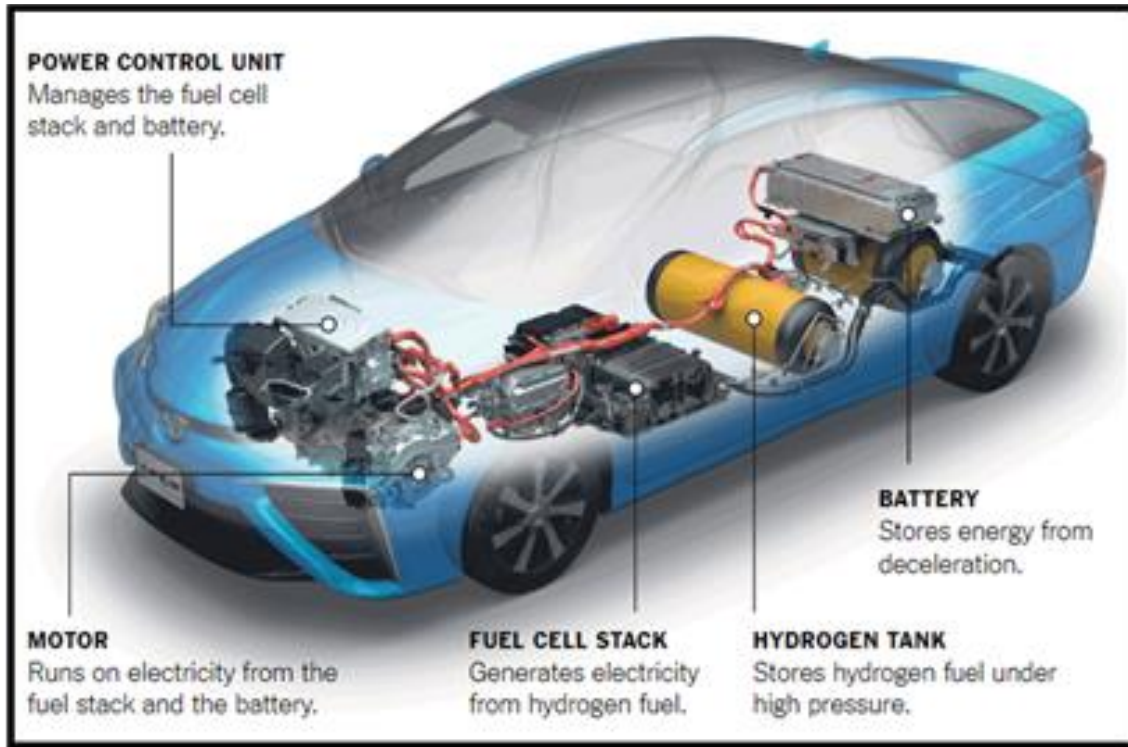


Figura 1. Componentes de un vehículo de hidrógeno de pila de combustible

Los vehículos de hidrógeno están equipados con uno o más depósitos de hidrógeno de alta presión. Estos depósitos son extremadamente resistentes, diseñados para almacenar el hidrógeno a presiones de hasta 700 bar. A pesar de su alta presión, la densidad energética del hidrógeno es menor que la de los combustibles tradicionales, por lo que estos depósitos suelen ser bastante grandes para proporcionar una autonomía comparable a la de los vehículos de gasolina.

La pila de combustible es el componente más importante de un vehículo de hidrógeno. Consiste en una serie de celdas individuales, cada una de las cuales genera electricidad a partir de una reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno. En cada celda, el hidrógeno se divide en protones y electrones. Los electrones se canalizan a través de un circuito externo, generando una corriente eléctrica, mientras que los protones pasan a través de una membrana hacia el lado del cátodo de la celda. Allí, se combinan con el oxígeno del aire y los electrones que han pasado por el circuito externo para formar agua, que se libera como subproducto. Esta es una característica única en los vehículos de hidrógeno [8].

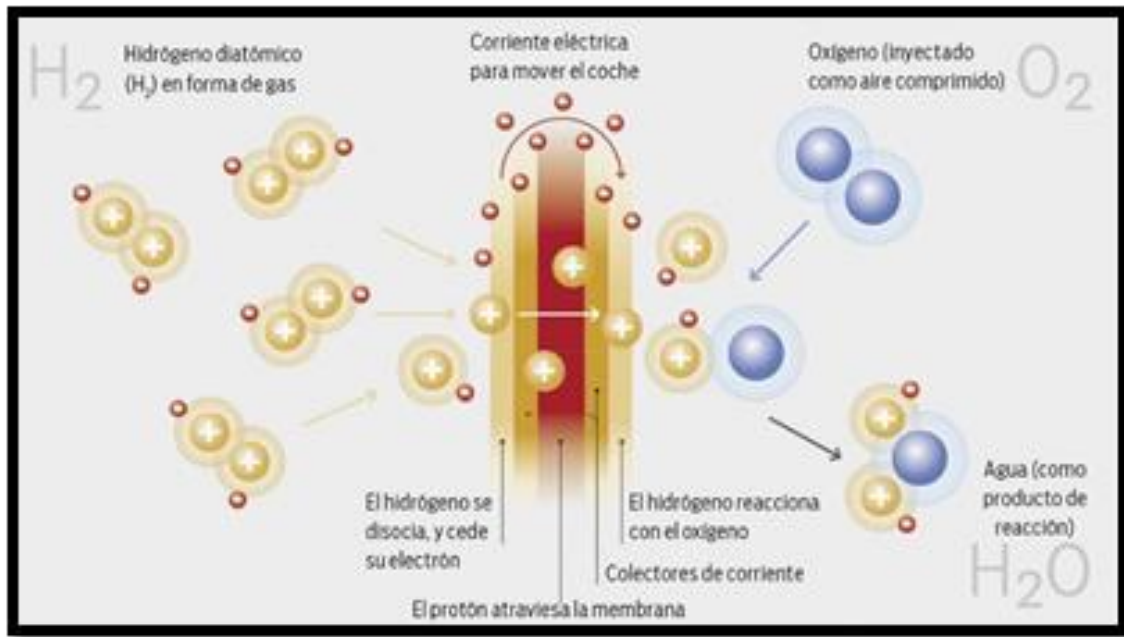


Figura 2. *Funcionamiento de una pila de combustible*

La batería de un vehículo de hidrógeno tiene una doble función. Por un lado, almacena la electricidad generada por la pila de combustible para su uso posterior. Esto permite al vehículo funcionar de manera eficiente, ya que puede almacenar energía cuando la demanda es baja y luego utilizarla cuando la demanda es alta. Por otro lado, la batería también puede proporcionar energía adicional durante los picos de demanda, cuando la pila de combustible por sí sola no puede generar suficiente electricidad. En un vehículo de combustión de hidrógeno, la batería puede no ser necesaria o puede tener un papel secundario, ya que la energía principal proviene de la combustión del hidrógeno.

El motor eléctrico de un vehículo de hidrógeno convierte la electricidad generada por la pila de combustible y almacenada en la batería en movimiento. A diferencia de los motores de combustión interna, los motores eléctricos pueden proporcionar su par máximo desde cero revoluciones por minuto, lo que significa que pueden proporcionar una aceleración rápida. Además, son mucho más eficientes que los motores de combustión interna y no producen emisiones de escape. En un vehículo de combustión de hidrógeno, el motor es un motor de combustión interna que quema hidrógeno en lugar de gasolina o diésel [8].

Además de estos componentes, los vehículos de hidrógeno también cuentan con un sistema de gestión térmica y un sistema de frenado regenerativo. El sistema de gestión térmica se encarga de mantener la temperatura adecuada en el vehículo, mientras que el sistema de frenado regenerativo permite recuperar la energía generada durante la frenada y almacenarla en la batería. Estos sistemas son comunes tanto en los vehículos de combustión de hidrógeno como en los de pila de combustible de hidrógeno de vehículos de hidrógeno.

2.3. Tipos de vehículos de hidrógeno

2.3.1. Pila de combustible

Los vehículos de pila de combustible, también conocidos como FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*), son una categoría de vehículos eléctricos que utilizan una pila de combustible para generar la electricidad necesaria para su funcionamiento. A diferencia de los vehículos eléctricos convencionales, que almacenan electricidad en una batería, los vehículos de pila de combustible generan su propia electricidad a bordo a través de una reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno. Esta reacción tiene lugar en la pila de combustible y como se ha explicado anteriormente es el componente clave en este tipo de vehículo de hidrógeno.

Los vehículos de pila de combustible tienen varias ventajas sobre los vehículos eléctricos convencionales. En primer lugar, pueden repostar hidrógeno en un tiempo similar al que se tarda en repostar gasolina, lo que es mucho más rápido que recargar una batería de un vehículo eléctrico. Además, los vehículos de pila de combustible presentan ventajas potenciales sobre los vehículos eléctricos convencionales en aplicaciones de larga distancia.

Pero existen desafíos asociados con los vehículos de pila de combustible. Uno de los principales es el costo y la disponibilidad del hidrógeno. Aunque el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, no se encuentra libremente en la naturaleza, por lo que debe ser producido a partir de otras fuentes, como el agua o los hidrocarburos. Este proceso consume energía, y si la energía utilizada no proviene de fuentes renovables, la producción de hidrógeno puede generar emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, la infraestructura de repostaje de hidrógeno es limitada, especialmente en comparación con la infraestructura de repostaje de gasolina o la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos. Esto puede hacer que los vehículos de pila de combustible sean menos prácticos para algunas personas, especialmente para aquellos que viven en áreas donde las estaciones de repostaje de hidrógeno son escasas.

Según la Agencia Internacional de la Energía, en la actualidad una pila tiene un coste de unos 200 €/kW, aunque se espera llegar hasta los 160 €/kW a corto plazo y hasta los 40 €/kW con un volumen de producción de 500.000 coches al año. Eso significa que la pila de combustible de 114 kW de un Toyota Mirai cuesta unos 20.000 € [9].

Comparativamente, en el caso de los vehículos eléctricos, de 2012 a 2022, el número de vehículos eléctricos vendidos cada año en todo el mundo mostró un crecimiento notable: de 18 mil vehículos eléctricos vendidos en 2012 a 10,2 millones vendidos en 2022. A nivel mundial, la demanda de electricidad por parte de los vehículos eléctricos aumentó de unos 2 mil GWh en 2012 a 65 mil GWh en 2022 [10].

En cuanto a los vehículos de gasolina, el porcentaje medio de vehículos que utilizan gasolina en la Unión Europea es del 51,1%, mientras que en el caso del

diésel es del 41,9% y los eléctricos puros representan un 0,8% de media en el parque automovilístico de 2021 [11].

2.3.2. Combustión de hidrógeno

Los vehículos de combustión de hidrógeno son una categoría de vehículos que utilizan hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna. A diferencia de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno, que generan electricidad a través de una reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno, los vehículos de combustión de hidrógeno queman el hidrógeno directamente en el motor para generar movimiento [12].

Estos vehículos son conocidos como H₂-ICE (*Internal Combustion Engine*), y son básicamente una versión modificada de un motor de combustión interna de gasolina. Utilizan el hidrógeno para causar pequeñas explosiones que generan movimiento. En estos motores, el hidrógeno se inyecta directamente en la cámara de combustión y enciende la mezcla, una vez comprimida, mediante una chispa provocada por la bujía.

En términos de construcción, los motores de combustión de hidrógeno no presentan grandes diferencias en comparación con los motores de gasolina, salvo en algunos elementos constructivos. Estos incluyen el uso de válvulas y asientos de válvulas endurecidos, bielas más resistentes, un tipo diferente de bujías, una bobina de encendido de mayor voltaje, inyectores de combustible diseñados para emplear gas en lugar de líquido, un amortiguador de cigüeñal más grande, material de junta de culata más resistente, uno o varios turbos y, por último, un colector de admisión modificado.

En cuanto a las emisiones, los motores de gasolina emiten dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes durante la combustión. Por otro lado, los motores de combustión de hidrógeno no producen CO₂ pero pueden emitir otros gases contaminantes en determinadas condiciones. Los únicos productos de la combustión del hidrógeno son energía y vapor de agua. Sin embargo, aunque la combustión de hidrógeno es completamente limpia, en un motor térmico siempre se producen algunas emisiones residuales. Los H₂-ICE generan cantidades muy pequeñas de CO₂ que proceden, sobre todo, de la combustión de la pequeña cantidad de lubricante que pudiera pasar a la cámara de combustión y quemarse junto al combustible. Por otra parte, también puede generar emisiones de NO_x siempre que emplee una relación aire/combustible estequiométrica. Esto es así porque, en esas condiciones, la temperatura de combustión es muy elevada y, como consecuencia, el motor tenderá a producir una cantidad significativa de NO_x. Para reducir la formación de óxidos de nitrógeno, los motores de hidrógeno suelen operar con una mezcla más rica en aire. Por lo tanto, los ICE de H₂ normalmente no funcionan con relaciones estequiométricas de aire/combustible. En cambio, está diseñado para funcionar con el doble de la cantidad de aire que teóricamente se requiere para una combustión completa.

Esto tendrá un impacto en la potencia del motor. La potencia de un motor de combustión interna de hidrógeno depende principalmente de la relación aire/combustible y del sistema de inyección utilizado, aunque suelen ser sistemas

de inyección directa. En el caso del hidrógeno, la mezcla estequiométrica es 34:1, es decir, una parte de hidrógeno por cada 34 partes de aire [12].

Si un H₂-ICE se opera con el doble de la cantidad de aire requerida, su potencia puede reducirse a la mitad, por lo que estos motores suelen ser más grandes que los motores de gasolina y también están turboalimentados. La turboalimentación ayuda a compensar las pérdidas de potencia al aumentar la cantidad de aire que ingresa al motor, lo que resulta en una combustión más completa y eficiente.

A pesar de estas ventajas, los vehículos de combustión de hidrógeno son menos comunes que los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Esto se debe en parte a la falta de infraestructura de repostaje de hidrógeno y al hecho de que la producción de hidrógeno es un proceso energéticamente intensivo. Sin embargo, estos vehículos tienen el potencial de desempeñar un papel importante en el futuro del transporte, especialmente en aplicaciones donde la densidad energética del combustible y la rapidez de repostaje son factores críticos [12].

3. EXPERIENCIAS EN EL USO DE VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO

El uso de hidrógeno en vehículos de transporte pesado de mercancías está ganando interés debido a su potencial para la descarbonización del sector.

Los camiones de pila de combustible propulsados por H₂ son fundamentales para lograr descarbonizar el sector del transporte pesado de mercancías. En Europa, circulan 6,6 millones de camiones (*medium & heavy trucks*), y este segmento representa el 5% de las emisiones globales de CO₂ en la Unión Europea.

Hyundai Motor Company y *Hyzon Motors* son dos fabricantes de referencia en el sector. Hyundai fue pionero en el segmento de los camiones de pila de combustible propulsados por H₂, con camiones circulando por las carreteras suizas y de Centroeuropa desde 2020.

Según un estudio de *Interact Analysis*, los camiones serán los vehículos más apropiados para integrar la tecnología de hidrógeno en el transporte en 2030. Se estima que en 2030 el mercado de camiones de hidrógeno llegará a las 45.000 unidades. También se estima que, en la próxima década, China liderará el mercado, con Europa siguiéndole de cerca.

Se han llevado a cabo demostraciones de la tecnología de pila de combustible en los camiones en Europa, empezando por los camiones de recogida de residuos. Según *Interact Analysis*, alrededor del 25% de los vehículos de hidrógeno que circulan por Europa son de recogida de residuos. En Alemania, el Gobierno ha apoyado la promoción del hidrógeno y la pila de combustible invirtiendo 354 millones de euros entre 2017 y 2021.

De esta cantidad, un 30% fue invertido en proyectos para adquirir 146 camiones de basura con pila de combustible y 22 camiones barredores.

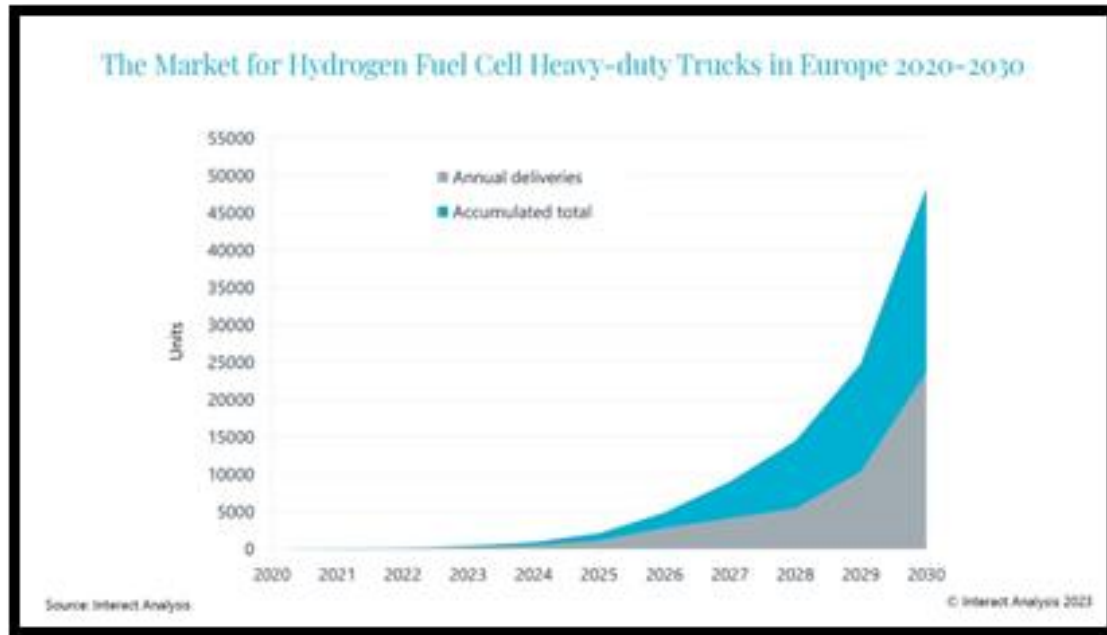


Figura 3. Evolución del mercado de camiones de hidrógeno

Hyundai ha dado el primer paso en el campo de vehículo comercial movido por hidrógeno en Europa. Como primera fase de un ambicioso plan en Suiza, el fabricante coreano entregó el primer camión para uso comercial de la región en 2020, con un objetivo de 50 camiones para finales de 2021. El alcance de la estrategia de Hyundai con los camiones de hidrógeno en Europa es expansivo.

3.1. Casos de estudio en España

La iniciativa Hydrogenizing Barcelona, lanzada en 2020, ha reunido a un consorcio internacional de más de 20 empresas, institutos de investigación y entidades públicas. Esta iniciativa cuenta con el apoyo institucional del Port de Barcelona y tiene como objetivo trabajar conjuntamente en la implantación de una economía del hidrógeno en Barcelona, su área metropolitana y su área de influencia (inter)nacional más amplia [13].

La iniciativa se esfuerza por crear un ecosistema inclusivo para las PYME que les permita participar en la evolución de la economía del hidrógeno verde, creando oportunidades comerciales más sostenibles y empleos de valor agregado. El hidrógeno verde, como vector energético y el desarrollo de la economía del hidrógeno, se encuentran entre las prioridades del "Green Deal" de la Unión Europea.

El Port de Barcelona fue identificado por los promotores *Kopala International* y *Resilient Group* como el lugar ideal para desarrollar una estrategia a largo plazo basada en hidrógeno verde como un componente clave de la transición energética en Barcelona y la región de Catalunya. Estos sectores representan una sólida demanda latente de hidrógeno verde, y los socios del consorcio están trabajando activamente para ampliar y alinear este ecosistema de demanda diversificada [13].

La implementación de la iniciativa no solo acelerará la descarbonización, sino que también conducirá a un aire más limpio y desencadenará un nuevo crecimiento económico en la región a medida que se desarrollen las nuevas infraestructuras de producción de hidrógeno, los vehículos eléctricos de pila de combustión de hidrógeno (FCEV), maquinaria industrial y el ecosistema de servicios respectivos. Dado que el hidrógeno verde se produce a partir del agua y la electricidad procedente de energías renovables, reduce la dependencia de los combustibles fósiles, aumenta la seguridad del suministro y refuerza las cadenas de valor industriales nacionales y regionales.

La Iniciativa de Hidrogenación de Barcelona se implementará en varias fases. La primera y fase de apalancamiento, conocida como H2BCN, se centra en el despliegue de una combinación de electrolizadores PEM (H2B2), alcalinos (John Cockerill) y AEM (Enapter) a una capacidad total de 20MW. Estos electrolizadores estarán alimentados por energía fotovoltaica en la azotea (BayWa re) en la Zona Franca y los PPA ecológicos virtuales, produciendo suficiente hidrógeno ecológico para aproximadamente 200 camiones *Fuel Cell* (Hyzon), otros vehículos FCEV e industria. En diciembre de 2020, los promotores del proyecto presentaron una expresión de interés al gobierno español para esta fase.

La segunda fase, conocida como Project100, se propone un compromiso definitivo con el hidrógeno en la movilidad, garantizando la disponibilidad de hidrógeno en línea con el crecimiento de la demanda. En esta fase, se aumentará la capacidad de producción de hidrógeno a 100MW. La propuesta del Project100 se presentó en febrero de 2021 bajo la *Green Deal Call* [13].

El proyecto H2BZMV se sitúa en el marco de estas dos fases. Este proyecto tiene un período de implementación de 3 a 4 años y se centra en el despliegue de 4 “*Hydrogen Hubs*” de 20MW cada uno. Estos *hubs* están diseñados para suministrar hidrógeno a la logística de transporte pesado y de larga distancia.

Cada *hub* tiene una capacidad de producción de 7.200 kg de hidrógeno por día e incluye infraestructura de compresión, almacenamiento y suministro. Se espera que estos *hubs* puedan suministrar hidrógeno a hasta 800 camiones de celdas de combustible de hidrógeno, así como a consumidores industriales.

La electricidad para la producción de hidrógeno se generará en el sitio o a través de la red de energías renovables. Además, el agua para la producción de hidrógeno provendrá de aguas residuales tratadas, lo que contribuye a la economía circular.

El proyecto H2BZMV ha sido aprobado por la IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía) y se espera que la construcción del proyecto comience en enero de 2023, con el inicio de las operaciones previsto para enero de 2026. Los *hubs* estarán ubicados en Barcelona, Zaragoza, Madrid y Valencia [13].

En cuanto a los vehículos de combustión de hidrógeno, un consorcio de empresas españolas, liderado por la aeronáutica ITP Aero, ha iniciado un proyecto que tiene como objetivo desarrollar tecnologías habilitadoras para la utilización de hidrógeno como fuente de energía fundamental para los sistemas propulsivos y auxiliares de

la aeronave. La previsión es que los primeros ensayos se puedan realizar a mediados de 2025. Este proyecto, denominado “Criogenia, Pilas y Combustión de Hidrógeno en el Transporte Aéreo” (CRIPICOM), cuenta con una inversión de 12 millones de euros y la participación de firmas como Destinus, Ajusa y Aerotecnic. Forma parte del Plan Tecnológico Aeronáutico, gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación de España (CDTI). El trabajo que llevará a cabo el consorcio incluye varias fases [14].

La primera fase se centra en el desarrollo de tecnología para el acondicionamiento de hidrógeno líquido. Esta fase es fundamental para la transformación de hidrógeno líquido en hidrógeno gaseoso y su regulación para uso en turbina de gas.

A continuación, en la segunda fase, se desarrollará un sistema de propulsión mediante una pila de combustible. En esta fase, se trabajará hasta llegar a un primer demostrador que incluirá sistemas de electrónica de potencia, motor eléctrico y un elemento propulsor (hélice o compresor) [14].

La tercera fase se centra en la investigación básica de la combustión de hidrógeno. Esta fase es crucial para el desarrollo de la tecnología de combustión de hidrógeno.

Finalmente, en la cuarta fase, se trabajará en la modificación de un motor existente para que pueda operar con una mezcla de gas natural e hidrógeno, poniendo las bases a una transición hacia la operación exclusiva con hidrógeno.

Destaca también un caso de camión de combustión de hidrógeno desarrollado por Mercadona, en colaboración con Disfrimur. Se trata del primer camión frigorífico propulsado con hidrógeno en el país. Este camión, equipado con la tecnología HPDI TM de Westport, realizó una ruta de transporte de mercancías refrigeradas entre los centros logísticos de Mercadona en Ciempozuelos y Getafe [15].

El vehículo repostó en la hidrogenera que la filial de Enagás, Scale Gas, tiene en la Avenida de Manoteras de Madrid. Versallis Tech Services se encargó del soporte técnico y la coordinación de la operación. Este proyecto representa un paso importante hacia la descarbonización del transporte pesado y la adopción de soluciones de energía más limpias y sostenibles.

El CEO de Disfrimur, Juan J. Sánchez, destacó la necesidad de camiones pesados de hidrógeno asequibles para ayudar a sus clientes, como Mercadona, a alcanzar sus objetivos de descarbonización del transporte. Por su parte, el *Managing Director* de Movilidad de Scale Gas, Miguel Ángel Castro Pérez, resaltó la importancia de este proyecto para avanzar hacia una logística más sostenible [15].

3.2. Casos de estudio en el resto del mundo

A nivel mundial, las ventas de vehículos de pila de combustible de hidrógeno son bastante bajas en comparación con los vehículos eléctricos de batería. En 2023, solo se vendieron unos 14.000 vehículos de pila de combustible en todo el mundo.

Las ventas se concentran principalmente en China, Corea del Sur y Japón, así como en Alemania y EE. UU. (casi en su totalidad en California).

Existen muchos proyectos de desarrollo de camiones de pila de combustible entre los que destacan, por ejemplo, Volvo Trucks, Renault Maxity Eléctrico y Hyundai Xcient Fuel Cell.

Volvo Trucks ha estado trabajando en el desarrollo de camiones eléctricos de pila de combustible propulsados por hidrógeno. Estos camiones solo emiten vapor de agua y tienen un rango operativo comparable a los camiones diésel, de hasta 1.000 km. Los camiones utilizan hidrógeno para producir su propia electricidad a bordo y son capaces de recorrer largas distancias, lo que los convierte en la opción ideal para transportes de largo recorrido [16].

Estos camiones han superado un hito importante tras haber sido probados en carreteras públicas. Las duras condiciones de las carreteras públicas del norte de Suecia, con hielo, viento y mucha nieve, constituyen un entorno ideal para las pruebas.

Volvo Trucks ha comenzado a probar vehículos utilizando esta nueva tecnología. Los camiones eléctricos de pila de combustible tendrán un alcance operativo comparable a muchos camiones diésel; de hasta 1.000 km y un tiempo de repostaje de menos de 15 minutos. El peso total puede ser de alrededor de 65 toneladas o incluso superior, y las dos pilas de combustible tienen la capacidad de generar 300 kW de electricidad a bordo.

Las pruebas con transportistas comenzarán en pocos años y la comercialización está prevista para el último periodo de esta década. Para acelerar el desarrollo, el Grupo Volvo ha unido fuerzas con Daimler para desarrollar y producir sistemas de pila de combustible hechos a medida para vehículos pesados [16].

El Renault Maxity Eléctrico es un camión que integra una pila de combustible que funciona con hidrógeno, desarrollada por Symbio FCell, que permite duplicar la autonomía del vehículo. Este camión eléctrico de 4,5 toneladas duplica su autonomía a 200 kilómetros y ha sido probado en condiciones reales de utilización, durante un año, en Dole (Francia). Este proyecto permitió que Renault Trucks explorara todos los potenciales de la tecnología de hidrógeno en condiciones reales de utilización [17].

Renault Trucks ha pre-equipado su vehículo Maxity Eléctrico de 4,5 toneladas para albergar una pila de combustible. De este modo, a la autonomía media de unos 100 kilómetros del Maxity Eléctrico, se añade una autonomía suplementaria de 100 kilómetros gracias a la energía proporcionada por esta pila. Cuando el vehículo circula, el motor eléctrico es alimentado por dos fuentes de energía complementarias: la pila de combustible proporciona una potencia máxima de 20 kW y, si se demanda mayor potencia, son las baterías las que proporcionan el complemento necesario.

Este proyecto fue una colaboración entre Renault Trucks y La Poste, la empresa que gestiona el correo en Francia. Esta colaboración permitió poner en circulación,

por primera vez en Europa, un camión eléctrico con un prolongador de autonomía que funciona con hidrógeno [17].

El Hyundai Xcient Fuel Cell es un camión de pila de combustible de hidrógeno que ha sido desarrollado de acuerdo con las regulaciones europeas. Este camión es el primer camión de gran tonelaje de pila de combustible de hidrógeno que se fabrica en serie y ya lleva dos años rodando por carreteras suizas [18].

El Xcient Fuel Cell cuenta con un nuevo sistema de pila de combustible de hidrógeno de 190 kW, compuesto por dos pilas de combustible de 95 kW conectadas en paralelo. El motor eléctrico creado por Siemens ofrece una potencia que ronda los 475 CV y un par de 3.400 Nm. Este camión puede recorrer hasta 400 km con una sola carga de combustible.

El camión incorpora siete grandes depósitos de hidrógeno, con una capacidad total de casi 35 kilogramos. El tiempo de repostaje oscila entre 8 y 20 minutos, dependiendo de la temperatura ambiente [18].

En los próximos años, el Xcient evolucionará para contar con dos pilas de combustible de 200 kW. La nueva línea incluirá camiones de carga 4x2 (como el actual), pero también 6x2 y tractoras 4x24. La tractora de 44 toneladas tendrá una autonomía de hasta 1.000 km con una sola carga, lo que permitirá reemplazar a los camiones con motores Diesel.

Además, el Hyundai Xcient Fuel Cell incorpora un motor de 350 kW (469 CV) y alcanza una velocidad máxima de 85 km/h. La capacidad de su depósito es de 32 kilos de hidrógeno y el tiempo necesario para su repostaje al completo es de 12 minutos. Por su parte, el consumo es de 7,5 kilogramos por cada 100 kilómetros.

También destaca el proyecto HyCET (*Hydrogen Combustion Engine Trucks*) que es una iniciativa de investigación aprobada por el Ministerio Federal de Digital y Transporte de Alemania (BMDV) en septiembre de 2022. El objetivo principal del proyecto es demostrar el potencial de sostenibilidad de los camiones con motores de combustión de hidrógeno para la logística del transporte [19].

El consorcio HyCET está liderado por el Grupo BMW y cuenta con la participación de DEUTZ AG, DHL Freight GmbH, KEYOU GmbH, TotalEnergies Marketing Deutschland GmbH y Volvo Group. El proyecto tiene un volumen de inversión de 19,5 millones de euros, de los cuales 11,3 millones de euros serán financiados por el BMDV. Además, el BMDV proporcionó 5,7 millones de euros adicionales para la construcción de dos estaciones de servicio de hidrógeno públicas principalmente para el tráfico pesado.

En cuanto a los camiones de prueba, HyCET espera tener listos, en un plazo de cuatro años, dos camiones de 18 toneladas y dos camiones de 40 toneladas con motores de combustión de hidrógeno que se probarán en la logística de transporte habitual de BMW Group y Deutz [19].

3.3. Beneficios observados

El uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías ha demostrado una serie de beneficios significativos. Uno de los más destacados es la reducción de emisiones. Los vehículos de hidrógeno son cero emisiones, liberando solo agua como subproducto. Esto significa que son una opción de transporte mucho más limpia en comparación con los vehículos de combustibles fósiles.

Además, los vehículos de hidrógeno son generalmente más eficientes energéticamente que los vehículos de gasolina o diésel. Esto se debe a que los motores eléctricos utilizados en los vehículos de hidrógeno son más eficientes en la conversión de energía en movimiento.

En términos de rendimiento y autonomía, los vehículos de hidrógeno pueden tener una autonomía similar o incluso superior a la de los vehículos de combustibles fósiles. Además, el tiempo de repostaje de un vehículo de hidrógeno es comparable al de un vehículo de gasolina o diésel, lo que los hace adecuados para operaciones de transporte de larga distancia.

Otro beneficio observado es la reducción de ruido. Los vehículos de hidrógeno son mucho más silenciosos que los vehículos de combustibles fósiles. Esto puede ser una ventaja significativa en áreas urbanas donde el ruido del tráfico puede ser un problema.

Finalmente, el uso de vehículos de hidrógeno puede impulsar el desarrollo de infraestructuras de energía limpia. Esto puede tener beneficios a largo plazo para la economía y el medio ambiente.

Estos beneficios han sido observados en una variedad de contextos, desde el transporte de mercancías en áreas urbanas hasta operaciones de larga distancia. También es importante tener en cuenta los desafíos asociados con el uso de vehículos de hidrógeno, como el costo inicial, la disponibilidad de infraestructuras de hidrógeno y la producción de hidrógeno de manera sostenible. A pesar de estos desafíos, las experiencias en el uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías hasta ahora han sido en gran medida positivas, lo que sugiere un futuro prometedor para esta tecnología.

3.4. Desafíos y soluciones implementadas

El uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías, aunque prometedor, también presenta varios desafíos. Uno de los más destacados es el costo inicial elevado. Los vehículos de hidrógeno suelen tener un costo inicial más alto que los vehículos de combustibles fósiles, y se han implementado varias soluciones para abordar este problema. Por ejemplo, algunos gobiernos y organizaciones han ofrecido incentivos financieros para la compra de vehículos de hidrógeno. Además, a medida que la tecnología mejora y se vuelve más común, se espera que los costos iniciales disminuyan.

Otro desafío importante es la disponibilidad de infraestructura de hidrógeno. La falta de infraestructura de hidrógeno, como estaciones de repostaje, puede ser un

desafío. Para superar esto, se han realizado inversiones significativas en el desarrollo de infraestructuras de hidrógeno. Además, se están explorando soluciones innovadoras, como la producción de hidrógeno in situ en las estaciones de repostaje.

La producción sostenible de hidrógeno también es un desafío. Aunque el hidrógeno es abundante, su extracción puede ser costosa y potencialmente dañina para el medio ambiente. Para abordar este desafío, se están investigando y desarrollando métodos más sostenibles y eficientes para la producción de hidrógeno, como la electrólisis del agua alimentada con energía renovable.

Finalmente, el almacenamiento y transporte de hidrógeno puede ser difícil debido a su baja densidad y alta reactividad y se han hecho avances en el desarrollo de materiales de almacenamiento de hidrógeno y tecnologías de transporte seguras y eficientes.

Estos desafíos, aunque significativos, no son insuperables. Las experiencias en el uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías han demostrado que, con la inversión y la innovación adecuadas, el hidrógeno tiene el potencial de ser una solución de transporte sostenible y eficaz. A medida que la tecnología continúa mejorando y las infraestructuras de hidrógeno se expanden, es probable que veamos un aumento en el uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías en el futuro.

4. ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

4.1. Costes Asociados con los Vehículos de Hidrógeno

Los vehículos de hidrógeno para el transporte de mercancías tienen costes asociados que pueden ser más altos que los de los vehículos convencionales. Estos costes incluyen el precio inicial del vehículo, que puede ser significativamente más alto debido a la tecnología relativamente nueva y avanzada que se utiliza. Además, los costes de infraestructura, como las estaciones de repostaje de hidrógeno, también pueden ser considerables.

En términos de costes operativos, el precio actual del hidrógeno es de unos 10 €/kg y el consumo típico de estos vehículos es de 0,8 kg/100 km. Por lo tanto, se estaría hablando de un coste de unos 8 €/100 km. Aunque este coste es más bajo que para un vehículo de gasolina, sigue siendo superior al consumo de un vehículo eléctrico, cuyo coste de recarga doméstica es de 1-2 €/100 km [20].

4.2. Análisis de Rentabilidad

A pesar de los costos iniciales más altos, el análisis de rentabilidad de los vehículos de hidrógeno para el transporte de mercancías puede ser favorable. Los vehículos de hidrógeno suelen tener costes operativos más bajos, ya que el hidrógeno puede ser más barato por kilómetro que los combustibles fósiles, especialmente si se produce utilizando energía renovable. Además, los vehículos

de hidrógeno suelen requerir menos mantenimiento que los vehículos convencionales, lo que puede resultar en ahorros a largo plazo.

Según un estudio publicado por *SynerHy*, los vehículos de hidrógeno tienen una mayor autonomía que los vehículos eléctricos, lo que los hace más adecuados para el transporte de larga distancia. Además, el tiempo de recarga de un vehículo de hidrógeno es mucho más corto que el de un vehículo eléctrico, lo que reduce el tiempo de inactividad y aumenta la productividad [21].

4.3. Incentivos y Políticas Gubernamentales

Los incentivos y políticas gubernamentales pueden jugar un papel crucial en la economía del hidrógeno. Muchos gobiernos alrededor del mundo están implementando políticas para promover el uso de vehículos de hidrógeno, como subsidios para la compra de vehículos de hidrógeno, inversiones en infraestructura de hidrógeno, y regulaciones que favorecen el uso de vehículos de cero emisiones.

Por ejemplo, el Ministerio de Transportes de España ha lanzado un plan con un presupuesto general de 174 millones de euros, que podrán ser ampliados hasta una cuantía de 400 millones. El proyecto contempla ayudas para vehículos híbridos, híbridos enchufables, de hidrógeno o eléctricos [22].

Además, el proyecto Hy2Tech en Europa cuenta con una inversión pública de 5.400 millones de euros que, completados con la aportación de fondos de la industria privada, se incrementará hasta casi alcanzar un techo de 14.000 millones [23].

5. FUTURO DE LOS VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

5.1. Innovaciones Recientes y en Desarrollo

En los últimos años, ha habido un aumento significativo en el interés y la inversión en la tecnología de hidrógeno para el transporte de mercancías. Se han llevado a cabo varios proyectos para acelerar la adopción de la tecnología de pilas de combustible en la industria de fabricación de vehículos de transporte de mercancías. Todos estos esfuerzos han resultado en el despliegue de más de 1.300 vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV) y más de 400 autobuses de hidrógeno entre 2005 y 2023 [24].

Además, se están desarrollando soluciones tecnológicas de movilidad inteligente y sostenible basadas en el hidrógeno para su aplicación en vehículos de transporte pesado. Por ejemplo, Técnicas Reunidas lidera un proyecto que desarrollará diversas soluciones tecnológicas de movilidad inteligente y sostenible basadas en el hidrógeno para su aplicación en vehículos de transporte pesado [25].

5.2. Proyecciones de Crecimiento y Adopción

Las proyecciones de crecimiento y adopción de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías son prometedoras. Según la Hoja de Ruta del Hidrógeno presentada por el Gobierno de España, se espera que para 2030, España tenga entre 5.000 y 7.500 vehículos ligeros y pesados, alimentados por hidrógeno verde, para el transporte de mercancías, así como entre 150 y 200 hidrogeneras [26].

Además, la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles (ACEA) establece la necesidad ineludible de contar con 60.000 vehículos pesados alimentados con hidrógeno en operación en 2030. Estos vehículos, complementados con los vehículos eléctricos de batería, serán un pilar fundamental para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de CO₂ [26].

6. CONCLUSIONES

A lo largo del capítulo, se ha explorado en profundidad el papel de los vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías. Los vehículos de hidrógeno presentan una serie de beneficios significativos, incluyendo su impacto positivo en el medio ambiente como vehículos de cero emisiones y su eficiencia energética superior en comparación con los vehículos de gasolina o diésel.

Pero existen desafíos asociados con el uso de vehículos de hidrógeno, como el costo inicial, la disponibilidad de infraestructuras de hidrógeno y la producción de hidrógeno de manera sostenible. A pesar de estos desafíos, el análisis de rentabilidad de los vehículos de hidrógeno puede ser favorable, especialmente cuando se consideran los costos operativos más bajos y los incentivos y políticas gubernamentales que están en lugar para promover el uso de vehículos de hidrógeno.

Aunque se ha aprendido mucho sobre los vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías, todavía hay áreas que requieren más investigación. La producción de hidrógeno es una de estas áreas, con la necesidad de desarrollar métodos de producción de hidrógeno más eficientes y sostenibles.

La infraestructura de hidrógeno es otro desafío significativo, y se necesitan más estudios para explorar las mejores formas de desarrollar y expandir la infraestructura de hidrógeno. Además, el almacenamiento de hidrógeno es un desafío debido a su baja densidad y alta reactividad, y se necesita más investigación para desarrollar materiales de almacenamiento de hidrógeno más seguros y eficientes.

Finalmente, a medida que la tecnología de hidrógeno continúa evolucionando, también lo harán las políticas y regulaciones. Se necesita más investigación para entender cómo las políticas y regulaciones pueden evolucionar para apoyar mejor el uso de vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías.

En resumen, aunque se han hecho progresos significativos en la comprensión de los vehículos de hidrógeno en el transporte de mercancías, todavía hay mucho que aprender. Con más investigación, se puede continuar avanzando en esta

tecnología prometedora y hacerla aún más viable para el transporte de mercancías en el futuro.

A día de hoy no existe evidencia concluyente de superioridad económica frente a otras alternativas de descarbonización.

7. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud al equipo docente de la asignatura *Organización, Desarrollo y Participación en Eventos de Difusión Científica* la labor realizada durante este semestre, en especial a mi tutora Blanca Del Valle Arenas Ramírez. Sin la iniciativa de vuestro equipo, este texto jamás se habría publicado.

8. REFERENCIAS

- [1] Slater, Neil. (2023). *DNV prevé que la demanda de petróleo en el sector del transporte se reduzca a la mitad en 2050*. DNV. Disponible en: <https://www.dnv.es/news/dnv-preve-que-la-demanda-de-petroleo-en-el-sector-del-transporte-se-reduzca-a-la-mitad-en-2050-242983>
- [2] M, S. (2021). *El transporte pesado representa solo el 4,5% de las emisiones de la UE*. Diario ABC. Disponible en: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-transporte-pesado-representa-solo-45-por-ciento-emisiones-202106050124_noticia.html
- [3] International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook 2018*. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Inventario nacional de emisiones a la atmósfera emisiones de gases de efecto invernadero. Serie 1990-2022. Informe resumen*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Documento-resumen-Inventario-GEI-2024.pdf>
- [5] Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Cuenta de emisiones a la atmósfera. Últimos datos*. Disponible en: https://ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176941&menu=ultiDatos&idp=1254735976603
- [6] Quiles, R. (2024). *Tendencias de transporte de mercancía y logística 2024*. Sertrans. Disponible en: <https://www.sertrans.es/tendencias-de-transporte-y-logistica-2024/>
- [7] Willis Towers Watson. (2023). *Los desafíos de la cadena de suministro en 2023: una mirada en profundidad*. Disponible en: <https://www.wtwco.com/es-es/insights/2023/05/los-desafios-de-la-cadena-de-suministro-en-2023-una-mirada-en-profundidad>

- [8] Toyota. (2023). *Diferencias entre un coche de hidrógeno y uno convencional*. Disponible en: <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/diferencias-coche-hidrogeno-convencional-toyota>
- [9] Gómez, J. M. F. (2020). *¿Qué es la pila de combustible de un automóvil? Advanced Fleet*. Disponible en: <https://advancedfleetmanagementconsulting.com/blog/2020/09/09/pila-de-combustible/>
- [10] Statista. (2024). *Vehículos eléctricos puros e híbridos enchufables en uso a nivel mundial 2012-2023*. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/600591/vehiculos-electricos-en-uso-a-nivel-mundial/>
- [11] Europa Press. (2023). *Casi dos tercios de los coches en circulación en España tienen más de 10 años y el 57% es diésel*. Disponible en: <https://www.europapress.es/motor/sector-00644/noticia-casi-dos-tercios-coches-circulacion-espana-tienen-mas-10-anos-57-diesel-20230123124258.html>
- [12] Wróbel, K., Wróbel, J. T., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., & Czerwiński, A. (2022). *Hydrogen Internal Combustion Engine vehicles: a review*. *Energies*, 15(23), 8937. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en15238937>
- [13] HydrogeBCN. (2020). *Hydrogenizing Barcelona*. Disponible en: <https://hydrogenizingbcn.com/es/hydrogenizingbarcelona/>
- [14] Aerotecnic. (2023). *CRlogenia, Pilas y COMbustión de hidrógeno en el transporte aéreo*. Disponible en: https://aerotecnic.com/wp-content/uploads/2023/02/crpi_es_descrip_l.pdf
- [15] Westport Fuel Systems. (2023). *Westport Collaborates with Transportation and Energy Partners on Hydrogen-Powered Heavy Truck Demonstration in Spain*. Disponible en: <https://investors.wfsinc.com/news/news-details/2023/Westport-Collaborates-with-Transportation-and-Energy-Partners-on-Hydrogen-Powered-Heavy-Truck-Demonstration-in-Spain/default.aspx>
- [16] Volvo Trucks. (2023). *Volvo Trucks prueba camiones eléctricos de hidrógeno en carreteras públicas*. Disponible en: <https://www.volvotrucks.es/es-es/news/press-releases/2023/may/volvo-trucks-tests-hydrogen-powered-electric-trucks-on-public-roads.html>
- [17] Renault Trucks España. (2021). *El primer camión con pila de combustible de hidrógeno en Europa*. Disponible en: <https://www.renault-trucks.es/news/el-primer-camion-con-pila-de-combustible-de-hidrogeno-en-europa>

-
- [18] Hyundai. (2022). *Datos del Hyundai XCIENT Fuel Cell*. Disponible en: <https://www.hyundai.com/es/es/zonaeco/eco-drive/tendencias/datos-camion-hidrogeno-hyundai-xcient-fuel-cell>
 - [19] BMW Group. (2022). *HyCET research project: Consortium promotes sustainable transport logistics using hydrogen trucks*. Disponible en: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0403940EN/hycet-research-project-consortium-promotes-sustainable-transport-logistics-using-hydrogen-trucks>
 - [20] Camarillo Blas, R. (2022). *Cómo funcionan los coches de hidrógeno llamados a revolucionar la automoción*. THE OBJECTIVE. Disponible en: <https://theobjective.com/motor/2022-11-10/coches-hidrogeno/>
 - [21] Palencia, J. (2022). *Camiones de pila de combustible propulsados por H2: Tres tecnologías*. SynerHy. Disponible en: <https://synerhy.com/2022/02/camiones-de-pila-de-combustible-propulsados-por-h2-tres-tecnologias/>
 - [22] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2021). *El Gobierno aprueba el Real Decreto que regula la transferencia de 400 millones de euros en subvenciones para descarbonizar el transporte profesional por carretera*. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/sala-de-prensa/noticias/mar-16112021-1646>
 - [23] Competition Policy. (2022). *Hydrogen value chain*. European Commission. Disponible en: https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei/approved-ipceis/hydrogen-value-chain_en
 - [24] De Benito, J. L. (2024). *Los retos del hidrógeno en el transporte tras dos décadas de aprendizaje*. Energy News. Disponible en: <https://www.energynews.es/retos-del-hidrogeno-en-el-transporte/>
 - [25] Europa Press. (2021). *Técnicas Reunidas impulsa un proyecto para utilizar hidrógeno en vehículos de transporte pesado*. Disponible en: <https://www.europapress.es/economia/noticia-tecnicas-reunidas-impulsa-proyecto-utilizar-hidrogeno-vehiculos-transporte-pesado-20210610130620.html>
 - [26] La Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones. (2021). *10 medidas para acelerar el despliegue de los vehículos de hidrógeno en España*. Disponible en: https://anfacs.com/wp-content/uploads/2021/10/20211025-NdP_ANFAC-Paper-10-medidas-Hidrogeno.pdf

6. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte público de personas

Javier Arias Buzunáriz

ABSTRACT

The aim of this document is to analyze the new opportunities that hydrogen fuel offers as an energy vector by examining and studying experiences with its use in public transportation, both currently and in the future. To understand this, it is first necessary to grasp the current context of transportation, pollutant emissions, and the European policies being developed to reduce them.

Hydrogen has physical properties that make it an attractive fuel for mobility. Although it's not commonly found independently in nature, it is considered the most abundant element in the universe, typically existing on Earth in combination with other compounds. In particular, this fuel is already used in public transportation in many countries through hydrogen buses, ferries, and trains, among others still having a long way to go in its development.

Keywords: Energy, public transport, hydrogen, fuel, innovation

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo el análisis de las nuevas oportunidades que ofrece el combustible de hidrógeno como vector energético mediante el análisis y estudio de experiencias de su uso en el transporte público de personas en la actualidad y en el futuro. Para entender esto es necesario en primer lugar asimilar el contexto actual del transporte, las emisiones contaminantes y las políticas europeas que se están desarrollando para disminuirlas.

El hidrógeno tiene propiedades físicas que lo convierten en un combustible atractivo para su uso en movilidad. Además, aunque no sea común encontrarlo de manera independiente en la naturaleza, es considerado el componente más abundante del universo, estando en la tierra normalmente unido a otros compuestos. En particular, este combustible ya es utilizado en el transporte público de muchos países mediante autobuses, *ferries* o trenes de hidrógeno entre otros, teniendo todavía su desarrollo mucho camino por delante.

Palabras clave: Energía, transporte público, hidrógeno, combustible, innovación

1. INTRODUCCIÓN

La industria del automóvil destaca actualmente por encontrarse ante un punto de inflexión de gran importancia para el futuro. Dados los objetivos de reducción de emisiones (tanto en Europa como en otras partes del mundo), el desarrollo de la tecnología y el contexto energético, político y social actuales son diversas las opciones sobre las que se debaten en cuanto a cuál será el transporte del futuro.

Como es bien sabido, desde la invención del automóvil (1886) [1], y hasta el siglo XXI, el vehículo de combustión ha liderado el mercado, sin ningún tipo de rival convincente, hasta la irrupción del vehículo eléctrico, cuyas ventas han aumentado año a año a nivel mundial hasta llegar en 2023 a aproximadamente 14 millones de vehículos eléctricos vendidos [2] (Figura 1). Esto ha sido en parte debido a las normativas europeas, que pretenden restringir la venta (que no la circulación) de vehículos de combustión hasta 2035 (Figura 1).

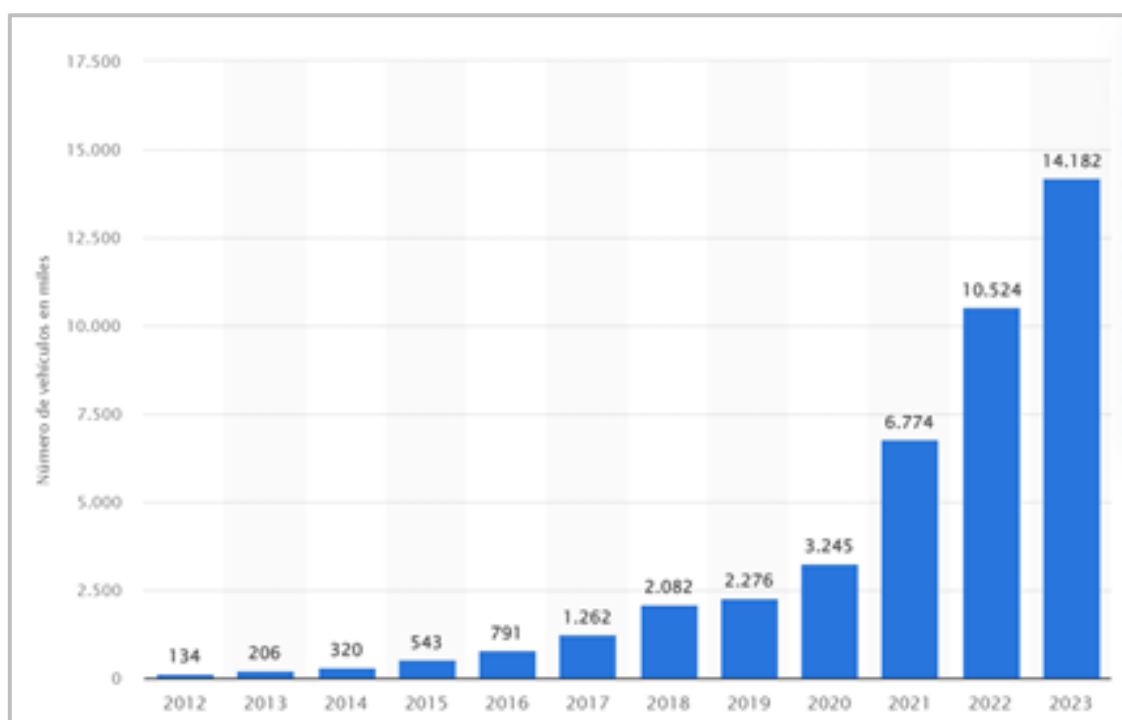


Figura 1. Venta de vehículos eléctricos a nivel mundial (2012-2023) [2]

Ante este contexto, el vehículo eléctrico era y es aparentemente favorito en sustituir al vehículo de combustión, pero en los últimos años ha surgido una nueva alternativa neutral en carbono que podría competir con los ya nombrados vehículos, que se trata de los vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Entre otras grandes diferencias, este tipo de tecnología resuelve alguno de los inconvenientes de los coches eléctricos propiamente dichos, como pueden ser el tiempo de recarga y la autonomía.

2. TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es elemento más abundante del universo. Aproximadamente el hidrógeno está presente en el 75% de la materia, aunque en su inmensa mayoría se encuentra formando compuestos junto con otros elementos. Se encuentra principalmente en estado gaseoso en la tierra [3].

El hidrógeno es también el elemento químico de la tabla periódica con menor densidad (0,0899 kg/m³ en condiciones normales), es por esto que, a pesar de tener la mayor densidad energética por unidad de masa de todos los combustibles, su ligereza hace que su densidad energética volumétrica resulte ser muy baja [3]. En cuanto a movilidad, conviene que la densidad sea más baja, no solo por lo ya expuesto, sino también debido al limitado peso y espacio, que es lo que en ocasiones condiciona a esta tecnología. Para conseguir esto, se opta por licuar, comprimir, añadirlo o convertirlo en otros compuestos químicos etc.

Los principales problemas actuales con el hidrógeno son la complejidad de dotarlo de un correcto y seguro sistema de almacenamiento, sus altos costes y la dificultad de los procesos previos de tratamiento de este componente.

Tabla 1. *Diferentes densidades del hidrógeno según estados de presión y temperatura, donde T₀= Temperatura ambiente y P₀= Presión ambiente [3]*

Variables		Densidad (kg/m ³)	Densidad energética gravimétrica (MJ/kg)	Densidad energética volumétrica (MJ/l)
T ₀	P ₀	0,0899	119	0,01
T ₀	P = 350 bar	24,4	119	2,9
T ₀	P = 700 bar	40,3	119	4,8
Licuado		71,4	119	8,5

2.1. Celdas de combustible

Particularmente, el coche de hidrógeno funciona con celdas o pilas de combustible. En este ámbito, esta tecnología es la que más destaca en la actualidad. Pueden usarse en diferentes modalidades, desde el suministro de electricidad y calor a edificios hasta la propulsión de automóviles con una autonomía superior. Son el elemento clave para transformar la energía del hidrógeno en electricidad.

Una pila de combustible (Figura 2) es un dispositivo electroquímico, que transforma la energía química almacenada en el hidrógeno en energía eléctrica.

Para ello, se produce una reacción redox [4]:

Reacción en el ánodo: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Reacción global: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

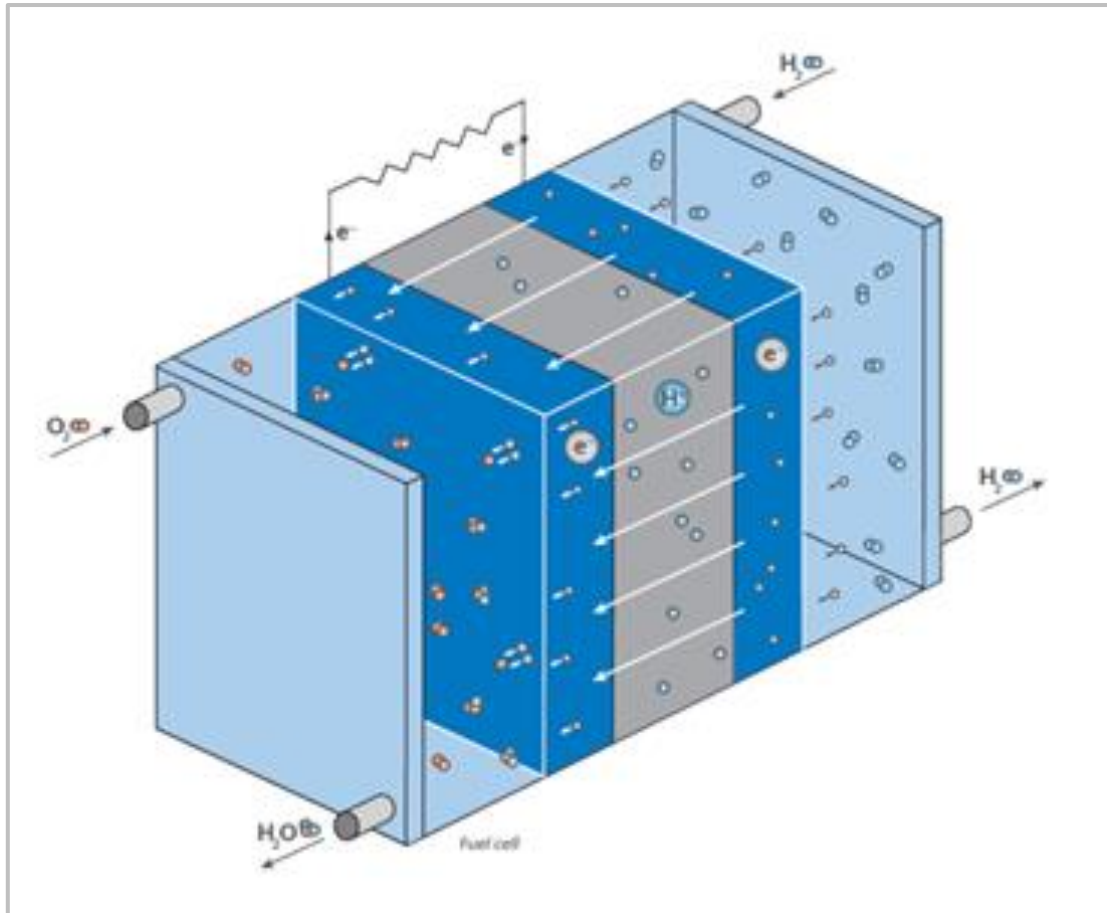


Figura 2. Esquema celda de combustible de hidrógeno [5]

De esta manera, en el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones se conducen a través de la membrana hacia el cátodo, y los electrones están forzados a viajar por un circuito externo como se ve en la figura (Figura 2) (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar H_2O . El único residuo es vapor de agua o agua líquida, y es esto por lo que destaca esta tecnología libre de emisiones contaminantes.

A modo de resumen, en una celda de combustible de hidrógeno los principales inputs son H_2 , O_2 y los outputs la electricidad y H_2O (vapor de agua) [5].

No tienen complejas piezas móviles ni las limitaciones de la combustión, por eso son silenciosas y tienen un rendimiento que mejora el de un motor convencional. En algunos casos se llega hasta un 90% de eficiencia sumando la energía eléctrica y calorífica (con cogeneración), que es muy superior a la de los motores de

combustión que no suelen superar el 25% en el caso de la gasolina o el 30% en el caso del Diésel. Descontando la cogeneración, la eficiencia de conversión directa de electricidad oscila entre un 40 y 60% en las celdas de combustible [5].

2.2. Producción del hidrógeno

Las pilas de combustible cuentan con cierta versatilidad en la elección de combustible, pudiéndose emplear tanto hidrocarburos como hidrógeno u otros compuestos hidrogenados con posibilidad de ser oxidados de manera electroquímica. Sin embargo, esto hace que esta tecnología pierda mucho interés por lo que lo que se pretende es acoplar estas pilas de combustible a fuentes de energía renovable que permitan producir hidrógeno, que se utilizará posteriormente para la conversión a electricidad, siendo así la fuente hidrógeno verde y el subproducto únicamente agua.

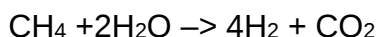
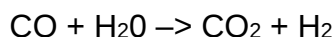
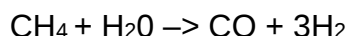
A pesar de que, el hidrógeno es un componente muy abundante en el planeta y en el universo conocido, es prácticamente imposible encontrar hidrógeno libre en nuestro planeta. Lo más común es que se encuentre unido a otros elementos formando compuestos, siendo los más frecuentes el metano (CH₄) y el agua (H₂O). Por esta razón, el hidrógeno es considerado como un vector energético, y no como una fuente de energía primaria [4].

Un punto importante es la metodología que se lleva a cabo para la producción del hidrógeno, ya que requerimos de cierta energía y procesos para separar el hidrógeno del resto de los componentes, lo cual marca si la procedencia del hidrógeno es verde (renovable) o no. Para ello es necesario hablar de las metodologías más destacables.

2.2.1. Reformado de hidrocarburos

El reformado de gas natural mediante vapor es el proceso predominante en la actualidad para la producción de hidrógeno. Este método implica un proceso termoquímico que necesita temperaturas muy elevadas y un posterior proceso de purificación para la corriente final [6].

La reacción ocurre en dos fases:



Además del reformado con vapor existen otras técnicas de reformado, como la oxidación parcial y el reformado autotérmico.

2.2.2. Electrólisis del agua

En este proceso electroquímico la molécula del agua se separa en sus dos componentes, hidrógeno y oxígeno. Para conseguir esto existen varios procesos:

a) Electrólisis alcalina

El tipo de electrolisis más utilizado es el de electrolisis alcalina, que emplea un electrolito básico o alcalino, alcanzando eficiencias del 80% [6]. Esta tecnología permite lograr grandes volúmenes de producción con costos relativamente bajos. Dentro de este sistema, se encuentran electrolizadores unipolares y bipolares, además de equipos que operan con salida presurizada o atmosférica. Además, algunos de estos equipos pueden conectarse a fuentes de energía renovable como la solar o la eólica, lo cual ayuda a manejar las fluctuaciones en la potencia.

b) PEM

Por otro lado, los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) utilizan un medio ácido y una membrana de intercambio protónico como electrolito. Estos son ideales para producciones pequeñas de hidrógeno debido a la ventaja de usar electrolitos sólidos. En comparación con la electrolisis alcalina, los electrolizadores PEM tienden a ser más costosos y tienen una menor capacidad de producción [6].

c) Electrolizadores de óxidos sólidos

También existen electrolizadores de óxidos sólidos que operan a alta temperatura, aunque esta tecnología aún está en etapa de investigación.

3. APLICACIONES EN EL TRANSPORTE PÚBLICO

Una vez se conoce la importancia de las nuevas tecnologías en el mundo del automóvil y el funcionamiento de la pila de combustible, se procede a especificar en una modalidad del transporte, de gran importancia para el ser humano, como conjunto, que se trata del transporte público.

Debido a algunos factores como el aumento de la población, las políticas de mitigación de emisión de contaminantes, y el avance de las nuevas tecnologías se estima que el uso del transporte público aumente año a año a nivel mundial (Figura 3). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), el transporte representó alrededor del 24% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la energía en 2022 [7]. De estas emisiones, alrededor de tres cuartas partes provinieron del transporte por carretera, como automóviles y camiones. A esto hay que sumarle la contaminación en aire debido a emisión de partículas, óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles.

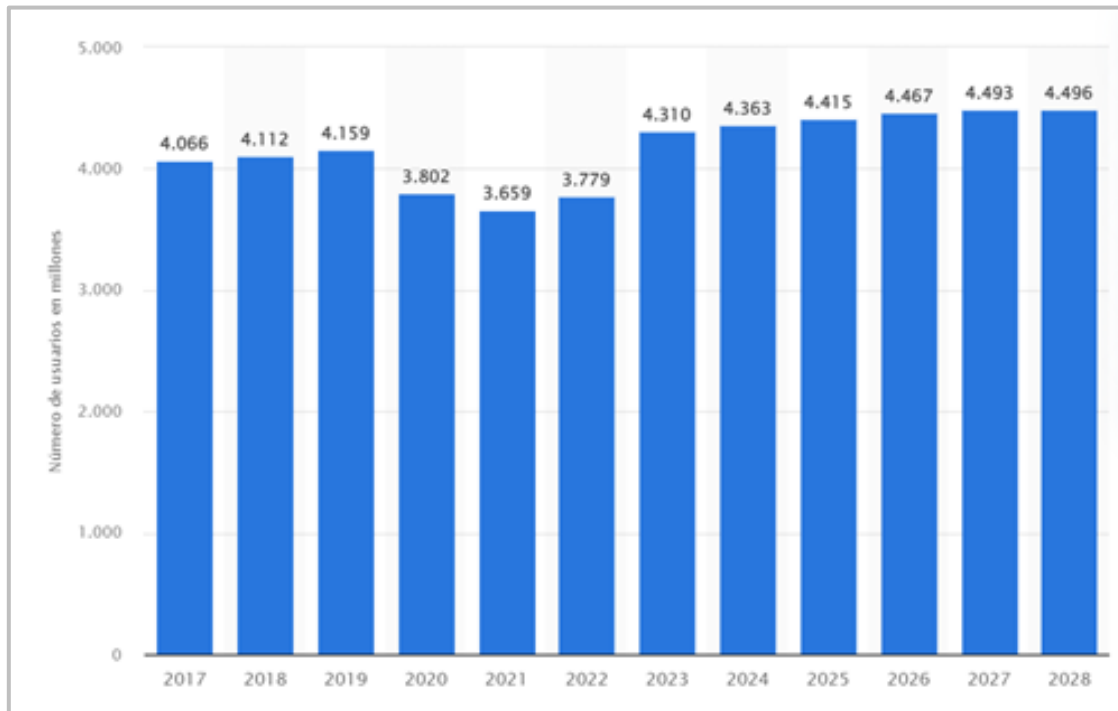


Figura 3. Número de usuarios transporte público a nivel mundial (2017 - 2028) con estimaciones [2]

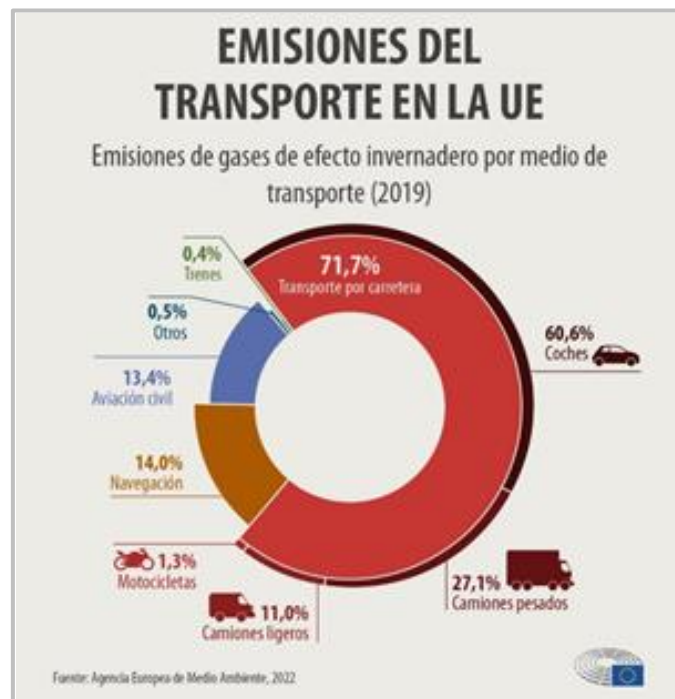


Figura 4. Emisiones GEI del transporte en la Unión Europea (2019). AEI [8]

Con estos datos, podemos llegar a la conclusión de que una gran parte de la contaminación mundial podría mitigarse incentivando el uso del transporte público y haciendo que este sea renovable. En este caso nos vamos a centrar en las

iniciativas tomadas en muchos países de adoptar el uso del hidrógeno en vehículos de transporte público.

En abril de 2024 hay 13 grandes estaciones de repostaje de hidrógeno en España y 2 en construcción (Tabla 2).

Tabla 2. *Estaciones de repostaje de hidrógeno en España (2024) [9]*

Nombre	Lugar	Construida	Puesta en marcha	Publico / Privada	Presión [bar]
Manoteras - Scale Gas	Madrid	Sí	2021	Privada	700
Coslada - HVR Energy	Coslada	Sí	Marzo 2023	Privada	350
Hidrogena Henares – Exolum	Torrejon de Ardoz, Madrid	Sí	2023	Pública	350
Entrevías - EMT Madrid	Madrid	En construcción	2024	Privada	350
FM Logistic Illescas	Illescas	Sí	2022	Privada	350
Puertollano - CNH2	Ciudad Real	Sí	2016	Privada	350 (ampliable a 700)
Eiffage Energía Albacete	Albacete	Sí	2023	Privada	350
Albacete - Ajusa	Albacete	Sí	2012	Privada	350
Valencia port (no in situ)	Valencia	Si	Dic 2022	Privada	350
EMT Palma - móvil	Palma	Sí	2023	Privada	350
Mallorca - Green Hysland	Palma	En construcción	2024	Privada	350 - 700
Barcelona – TMB	Barcelona	Sí	2021	Pública	350
Estación de Servicio "El Cisne"	Zaragoza	Si	2023	Pública	350
Huesca - FHa	Huesca	Sí	2010	Privada	350 - 700

El objetivo que se ha impuesto en España es el de desarrollar una red con más de 100 hidrogenaras para 2030.

3.1. Autobuses de hidrógeno

Los autobuses de hidrógeno son por excelencia la iniciativa más popular hasta ahora en cuanto a innovación renovable de hidrógeno en transporte público se refiere. Es uno de los transportes públicos más utilizados a nivel mundial, y, representan una aplicación clave para la tecnología de celdas de combustible en el transporte público.

Un autobús de hidrógeno se trata de un autobús que utiliza pila de combustible de hidrógeno para su funcionamiento, aunque en ocasiones se utilizan modelos híbridos que también cuentan con baterías eléctricas. En la actualidad son varias las ciudades que están implementado el uso de estos autobuses y se estima que haya en torno a unos 6.000 autobuses de hidrógeno en el mundo en funcionamiento.

En el año 2001 la Unión Europea apoyó el proyecto de investigación *Clean Urban Transport for Europe* (CUTE) [10], por el que la Comisión Europea concedió un total de 18,5 millones de euros para el despliegue de autobuses de hidrógeno en ciudades de 9 países europeos (Hamburgo, Londres, Barcelona, Estocolmo, Oporto, Stuttgart, Amsterdam, Luxemburgo y Madrid). El objetivo del proyecto fue demostrar la viabilidad de un sistema de transporte público innovador, limpio, seguro y eficiente en diferentes ciudades del continente. Tras 5 años de proyecto, los resultados fueron enriquecedores demostrando su viabilidad, y contribuyendo al desarrollo y aceptación de esta tecnología en la Unión Europea y resto del mundo, tratándose del primer proyecto del mundo a tan gran escala. Los puntos básicos del proyecto fueron los siguientes:

- Demostración de la eficacia del uso de 27 autobuses de pila de hidrógeno (modelo Mercedes-Benz Citaro) en condiciones reales de transporte público.
- Diseño, construcción y operación de la infraestructura necesaria para la producción, distribución del hidrógeno y desarrollo de hidrogenaras. El hidrógeno fue producido tanto “on-site” como “off-site” mediante métodos como electrolisis, reformado de hidrocarburos, o procesos en refinerías.
- Desarrollo de nuevos conocimientos sobre este tipo de vehículos y su infraestructura para garantizar una correcta seguridad del sistema.
- Análisis comparativo de resultados con otras tecnologías vigentes en el mercado.
- Aumentar la aceptación y el entendimiento en la población creando una cultura de energía renovable del hidrógeno y transporte público en las ciudades.

Durante el proyecto, más de 4 millones de pasajeros experimentaron de manera directa el innovador transporte mediante autobuses de esta tecnología. La actividad de estos autobuses se llevó a cabo como la de cualquier otro, en

condiciones de operación completamente estándar. El total de los 27 autobuses llegaron a recorrer una distancia equivalente a la de dar 20 veces la vuelta al mundo (865.000 km), operando durante 64.000 horas totales.

Los rangos de las distancias de cada autobús fueron de entre 40.000 – 140.000 km mientras que las horas de operación fueron de 300 – 10.000 horas en función de las características de cada ciudad. El tiempo de vida más alto registrado de una unidad de una pila de celda de combustible fue de más de 3200 horas de operación. (133 días si hubiese trabajado durante 24 horas constantemente) [10].

Los resultados fueron satisfactorios, no encontrándose grandes puntos débiles en las celdas de combustible, aunque si en otros componentes como los inversores, que debían ser mejorados.

La infraestructura del hidrógeno también era un punto de estudio del proyecto, y es considerado como una de las dificultades a la hora de afrontar un futuro con hidrógeno. Todas las estaciones de servicio (hidrogeneras) estuvieron disponible durante el 80% del tiempo de duración del proyecto, a excepción de una. En cuanto a la producción del hidrógeno, la tecnología *off-site* demostró una alta fiabilidad, y dentro de la tecnología *on-site*, los electrolizadores tuvieron un óptimo funcionamiento, mientras que el reformado con hidrocarburos a pequeña escala requería de ciertas mejoras. Estas estaciones abastecieron a los autobuses con un total de 192.000 kg de hidrógeno en más de 8.900 llenados, siendo más del 40% de este hidrógeno proveniente de energías renovables [10].

A pesar de estos positivos resultados, se vio que la eficiencia energética en la producción del hidrógeno y la infraestructura era en ámbitos generales un poco pobre. Debido a esto, el impacto medioambiental de esta tecnología dependió mucho de su eficiencia y del tipo de producción de hidrógeno, es decir, de la ruta elegida y el tipo de estación de repostaje, particularmente de si el hidrógeno era de origen renovable o no, llegándose a la conclusión de que hacía falta más inversión en renovables y una reducción en los costes del hidrógeno, ya que aunque sea mejor para el medio ambiente, en la actualidad el hidrógeno verde resulta más caro que el originario de otros combustibles fósiles (a pesar de estar reduciéndose este coste).

Esta iniciativa fue seguida de proyectos como ECTOS (*Ecological City Transport System*) en Reikiavik, Islandia, o STEP (*Sustainable Transport Energy for Perth*), en Perth, Australia, siendo ambos desarrollados entre 2001-2005 llegaron a unas conclusiones similares al proyecto inicial ya mencionado, siempre demostrando la viabilidad y seguridad del sistema, e incurriendo en la problemática de los costes de los vehículos y de la infraestructura.

A su vez, China, en 2005 compró 3 autobuses de hidrógeno contando con ayudas económicas del programa de desarrollo de las naciones unidas, para demostrar también la posibilidad de habilitar un transporte limpio en emisiones. Sin embargo, la eficiencia de las pilas de combustible se veía reducida por la alta polución en aire que había, por lo que acabaron retirando los autobuses. Es importante recordar que los combustibles fósiles como el carbón o el petróleo formaban el 90% de la energía total de China.

Dado que estos proyectos fueron llevados a cabo en la primera década del siglo XXI, el contexto energético en Europa y el resto del mundo ha cambiado mucho. La inversión y apuesta por las energías renovables permite abaratar los costes del hidrógeno, lo cual, teniendo en cuenta el avance del hidrógeno y los motores eléctricos en el sector del automóvil está permitiendo unas mejores eficiencias energéticas en los vehículos de pila de hidrógeno.

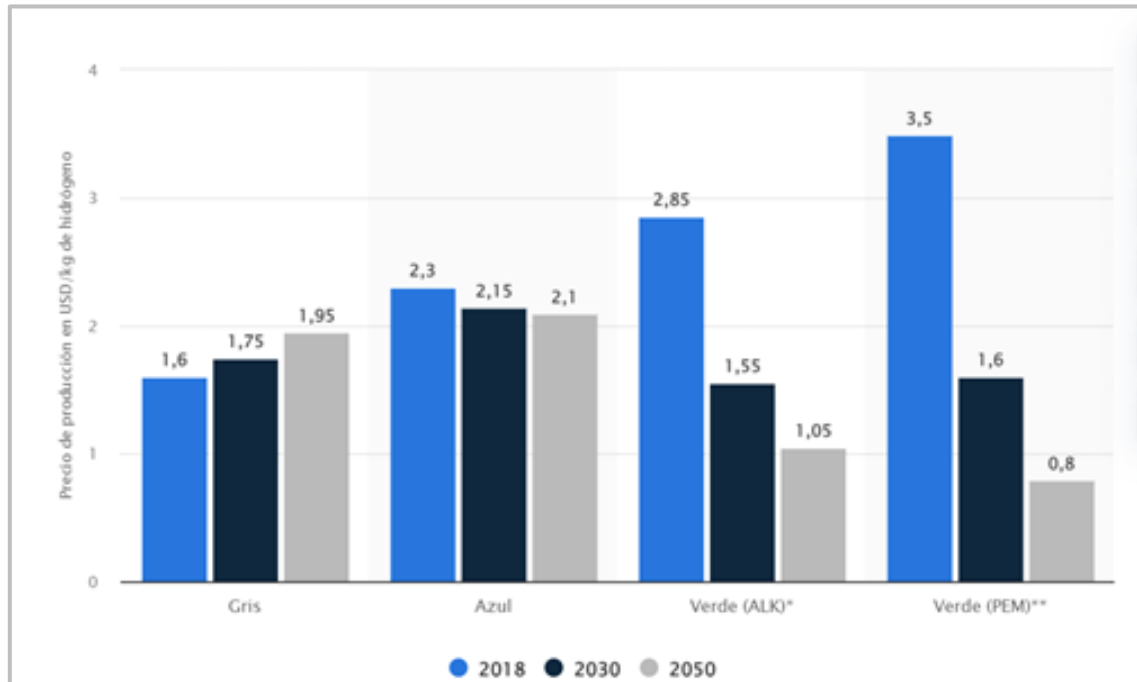


Figura 5. Precio de producción del hidrógeno [USD/kg H₂] (2018/2030/2050) [2]

En la actualidad, son muchos los países que ya han optado por introducir autobuses de hidrógeno en su flota de transporte público.

En Madrid, en enero del año 2022, se implementó el primer autobús propulsado por hidrógeno del país (de la mano de la empresa ALSA, en el marco del proyecto CUTE), para una línea de transporte público urbano en Torrejón de Ardoz. El autobús de la línea cuenta con una capacidad para 37 kg de combustible y tiene un consumo de en torno a 7 litros de hidrógeno verde por cada 100 km. Lo cual supondría el consumo de 50 litros de diésel, evitando así la emisión de 132 kg de CO₂. Esta iniciativa fue seguida por otras regiones del país como Barcelona, donde 5 meses después se puso en marcha un autobús de hidrógeno verde con cero emisiones, estimándose que TMB tendrá 46 autobuses de hidrógeno en 2025 [11].

Tras estos 2 proyectos se han sumado más regiones de España como, Mallorca (con 5 autobuses de hidrógeno) de 12 metros, u otras como Zaragoza, Tarragona, Málaga, Cantabria, Vizcaya, que han aprobado fondos para financiar estas nuevas tecnologías, o bien están en fase de pruebas.

El proyecto más grande actualmente, se encuentra en Madrid, donde EMT está construyendo una hidrogenera que abarcará todo el ciclo de producción,

almacenamiento y distribución del hidrógeno verde, con una inversión de más de 10 millones de euros cofinanciados por los FEDER (Fondos Europeos de Desarrollo Regional). Esta construcción servirá para abastecer a una primera flota de 10 autobuses de la EMT que circularán por Madrid, que tendrán una autonomía de hasta de 400 km (20 horas) y un tiempo de recarga de pilas estimado de 5 a 10 minutos, con los tanques de almacenamiento en la parte superior delantera con una capacidad total para 37,5 kg de hidrógeno [12].

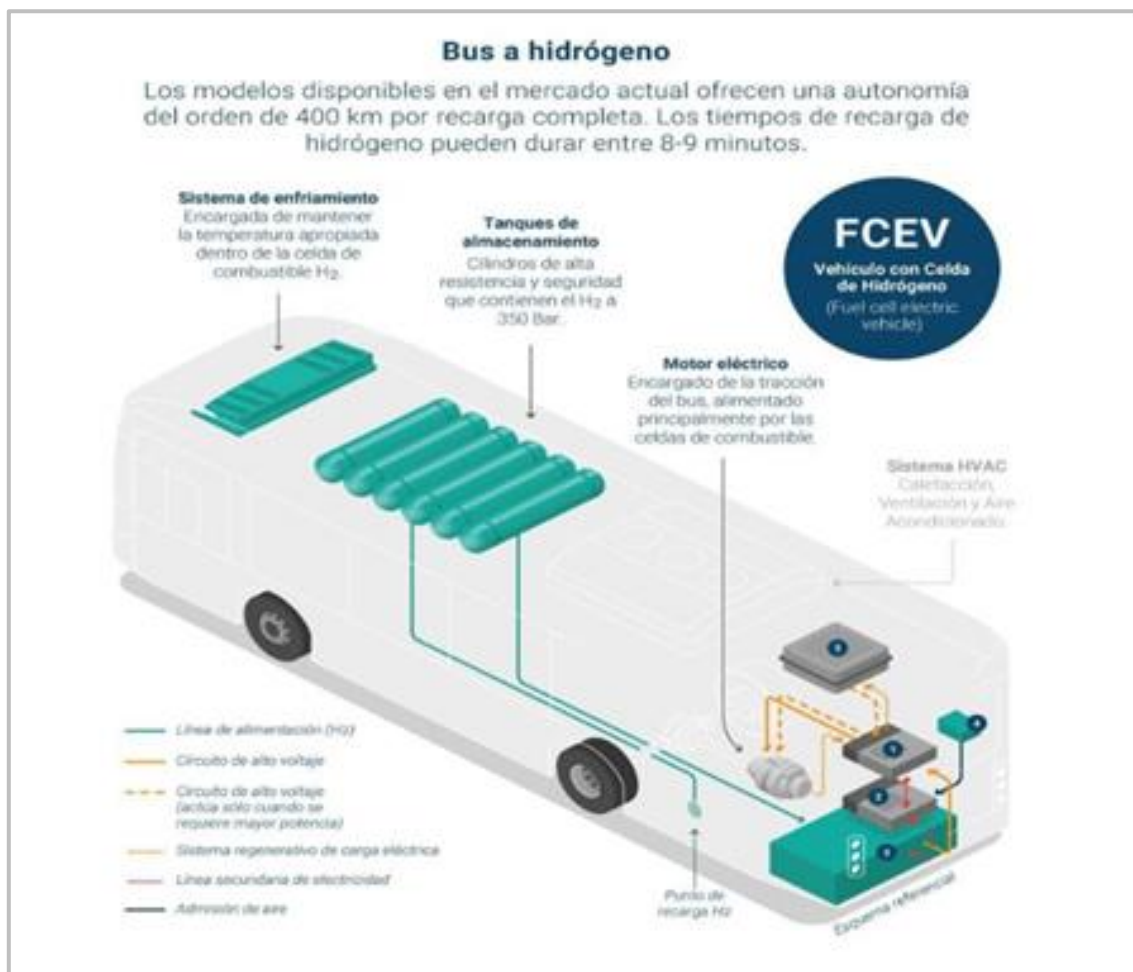


Figura 6. Esquema de componentes y funcionamiento de un autobús propulsado por celda de combustible de hidrógeno

Fuera de España, algunos países que cuentan con autobuses de hidrógeno son los siguientes, entre otros:

- **-China:** Ha implementado autobuses de hidrógeno en ciudades como Pekín, Shanghái, encontrándose en un momento de inversión en la infraestructura de esta tecnología.
- **-Corea del Sur:** Como parte de su estrategia de la energía basada en el hidrógeno, ha lanzado autobuses de hidrógeno en ciudades como Seúl o Hinceon, donde planean lanzar un total de 700 autobuses de esta tecnología para finales de 2024.

- **-Japón:** A diferencia de la mayoría de los casos, se ha asegurado de brindarse de una buena infraestructura de abastecimiento y producción de hidrógeno en primer lugar, para luego introducir vehículos con más facilidad. Está prevista la introducción de autobuses y camiones de hidrógeno en ciudades como Tokio, o Fukuoka, aunque de momento se encuentran en fase de pruebas. De hecho, se pretendía implementar una flota de 100 autobuses de hidrógeno para los juegos olímpicos de 2020, pero este proyecto fue cancelado debido al coronavirus.
- **-Alemania:** Ciudades como Fráncfort y Hamburgo han apostado por esta tecnología
- **-Reino Unido:** Cuenta con autobuses propulsados por hidrógeno en Londres y Aberdeen.
- **-Estados Unidos:** Grandes ciudades como Los Ángeles o San Francisco ya cuentan con una flota de autobuses de hidrógeno con planes de expandirla.
- **-Brasil:** No solo en Europa o América del Norte, se ha llevado a cabo esta iniciativa, sino que también en Brasil, en Sao Paulo, se presentó lo que fue el primer autobús movido por hidrógeno de Latinoamérica.

3.2. Trenes de hidrógeno

Alrededor del año 2000 nació un término conocido como “*hydrail*”, que incluye tanto los trenes de pilas de combustible de hidrógeno como los trenes de combustión interna de hidrógeno, siendo los primeros los más destacables. Los *hydrails* son por lo general vehículos híbridos con almacenamiento de energía renovable, como pueden ser baterías.

En España, más concretamente, en el pirineo aragonés, el proyecto FCH2Rail está siendo llevado a cabo por un conjunto integrado por Adif, Renfe, Toyota, CNH2, CAF, DLR, IP y Stemmann-Technik con un presupuesto de 14 millones [13], en el que se pretende demostrar la viabilidad de un tren propulsado por hidrógeno. Está previsto que el proyecto que comenzó en 2021 finalice en 2024. En la primera fase del proyecto se demostró su viabilidad, al superar el trayecto, que fue elegido explícitamente por sus demandantes características para los nuevos sistemas de generación. Durante este trayecto, el tren operó en modo eléctrico (en las zonas electrificadas) y en modo híbrido (mezclando la tecnología de hidrógeno y las baterías) en las zonas sin electrificar del trayecto.

También en España, en 2024, el proyecto Hympulso ha juntado a una decena de empresas para llevar a cabo la propulsión por hidrógeno de un tren de alta velocidad por primera vez (a partir de un tren talgo 200 (Figura 7), formando parte del ERTE (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) [14].



Figura 7. Tren modelo talgo 200 de la flota RENFE, expuesto sin la infraestructura eléctrica

Países como España, Francia, Dinamarca, el Reino Unido y, ahora, EEUU ya han confirmado planes para esto.

Si se habla de trenes de hidrógeno es indispensable hablar de Alemania, país pionero, que introdujo el primer tren de estas características en el mundo. Alemania inauguró la primera línea ferroviaria del mundo mediante el uso de hidrógeno. Al igual que los autobuses de hidrógeno, estos trenes funcionan con pila de combustible, que se encarga de generar electricidad a partir del hidrógeno almacenado y el oxígeno del ambiente.

En la nación, esta tecnología es la favorita para la reducción de emisiones de CO₂ y sustitución del diésel, que hasta el momento impulsaba el 20% de los viajes en tren en Alemania. Sin embargo, el 95% del hidrógeno utilizado proviene de combustibles fósiles, algo que se espera mejore con los años y con el desarrollo de la electrolisis. En cuanto a viabilidad, durante 4 años, la flota que se implementó en Baja Sajonia demostró tener un óptimo funcionamiento [14].

Los trenes Coradia iLint pueden recorrer hasta 1.000 km y operar todo un día con solo un tanque de hidrógeno. Normalmente, alcanzan velocidades entre 80 y 120 km/h, aunque tienen la capacidad de llegar a los 140 km/h. Estos trenes están ya o se prevé que entren en funcionamiento en Italia y Francia, donde ya se han realizado los primeros viajes

En Alemania, los resultados mostraron que, aunque técnicamente no mostraban problemas, económicamente no resultaban ser viables en comparación con los eléctricos o híbridos a largo plazo, especialmente debido a la infraestructura del hidrógeno y la disponibilidad de este combustible. Más concretamente en el informe publicado por el Ministerio de Transporte de Baden-Württemberg, estimó que, en 30 años, los costes de un sistema a hidrógeno serían de 849 millones de euros, el del modelo eléctrico a batería sería de 506 millones de euros, y el de un tren eléctrico convencional de 588 millones de euros [15]. Es por ello, que, a pesar de disponer de 14 modelos de estos trenes, se han detenido los trenes, poniéndolos fuera de circulación y pausando así el proyecto.

3.3. Barcos y ferries de hidrógeno

En el último lustro, se ha empezado a desarrollar la idea de barcos propulsados por hidrógeno. Son varios los principales proyectos que se están llevando a cabo.

El proyecto *Energy Observer* (Figura 8), lleva operando desde el año 2013, habiendo navegado a fecha de 2022 más de 15.000 millas náuticas, su principio y motor es la energía renovable, ya que su funcionamiento está basado en hidrógeno, energía solar y eólica. En cuanto al hidrógeno los 63 kg de hidrógeno almacenados a bordo en 8 tanques proporcionan 2 MW de electricidad, es decir, el consumo medio de un hogar de 4 personas durante un mes [16]. Según explica Romain Jallon (Director de Operaciones de EODev): “Los motores eléctricos del Hynova funcionan con una fuente de energía híbrida: una pila de combustible (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) por un lado y baterías (LiFePO₄) por otro. El hidrógeno se almacena en depósitos de fibra de carbono, a presión (350 bares). Las ventajas con respecto a las otras opciones son las mismas que se encuentran a bordo del barco *Energy Observer*: cero emisiones (sin CO₂ ni partículas finas), silencio y mayor densidad de potencia y energía que con una solución “todo batería””.

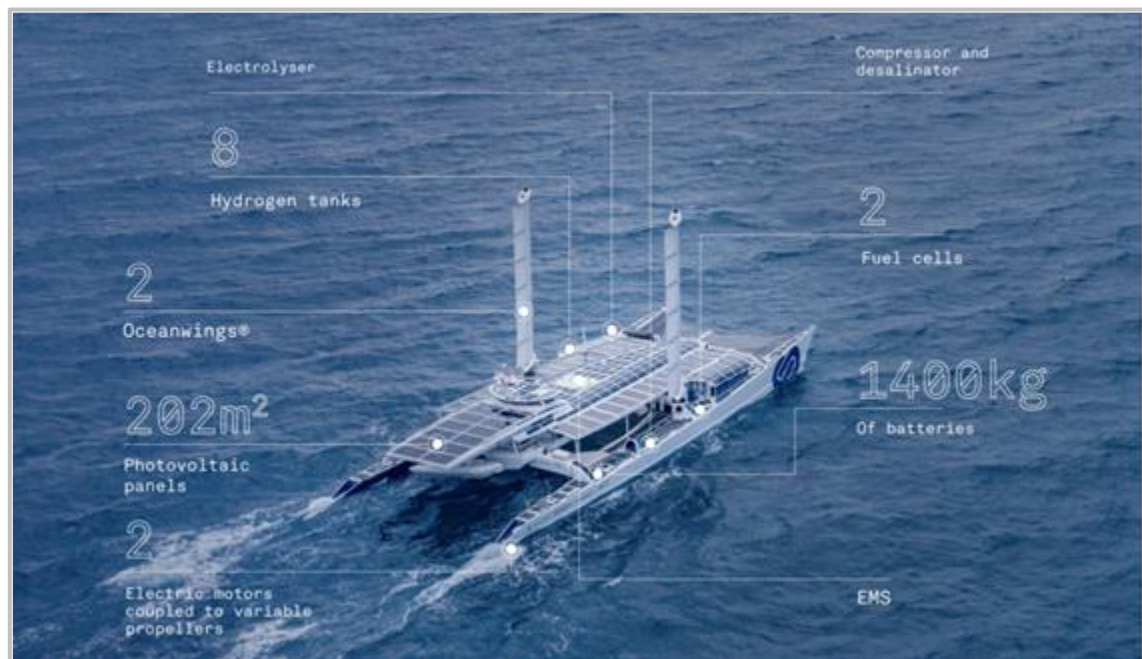


Figura 8. Embarcación *Energy Observer* y algunas de sus características

El proyecto *MF Hydra*, se trata también de uno de los primeros ferries de hidrógeno del mundo. El *MF Hydra* (Figura 9) se trata de un barco de 80 metros de eslora con una capacidad para casi 300 pasajeros, 80 automóviles y 10 camiones a velocidad de crucero de 9 nudos [17], habiendo sido diseñada por LMG Marin y construida por el astillero Westcon Yards de Ølen en Noruega, ya entró en funcionamiento y opera recorriendo la costa noruega entre las localidades de Hjelmeland, Skipavik y Nesvik. Este ferry destaca porque funciona especialmente con hidrógeno líquido, que suele utilizarse en la industria aeroespacial. El barco está formado por dos células de combustible que dan una potencia total de 400

kW, una batería de 1,36 kWh y dos generadores diésel de 440 kW, teniendo el tanque de hidrógeno líquido una capacidad de 80 metros cúbicos. A diferencia de los barcos alimentados solo eléctricamente, que tenían que recargar la batería cada vez que llegaban a puerto, este vehículo puede estar hasta tres semanas sin ser recargados, al operar al 50% con hidrógeno [17]. Por último, en caso de fallar el sistema de hidrógeno y las baterías, el buque podría ser propulsado utilizando biodiesel en sus generadores, permitiendo así que el buque pueda reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera hasta en un 95%.



Figura 9. Embarcación MF Hydra [17]

3.4. Aviones de hidrógeno

Airbus es una multinacional europea de aviones comerciales, entre otros, siendo uno de los principales fabricantes de aeronaves del mundo, y está siendo a su vez la empresa encargada de una iniciativa de varios prototipos de aviones totalmente impulsados a base de hidrógeno, los cuales prevén estén en funcionamiento en 2035.

Airbus ha bautizado este proyecto como ZEROe (Figura 10), se trata del desarrollo del prototipo de 4 aeronaves de hidrógeno, algunas de ellas propulsadas por reactores, ya sea mediante combustión de hidrógeno o mediante la hibridación de tecnologías de combustión y celdas de combustible de hidrógeno, y otras propulsadas de manera puramente eléctrica mediante celdas de combustible de hidrógeno. En el caso de la combustión del hidrógeno, tiene un funcionamiento similar al de los aviones convencionales de la actualidad, tratándose el sistema de turbinas de gas con inyectores de combustible modificados, de manera que se inyecte hidrógeno. Es importante recordar que ambas tecnologías son complementarias, siendo así los beneficios que aportan aditivos. Aunque el proyecto se encuentra en fases iniciales, los principales retos a afrontar son el difícil almacenamiento del hidrógeno, ya que requiere hasta 4 veces más almacenamiento que el combustible convencional, lo que obliga a requerir de espacios excepcionales, además de los retos a afrontar por el resto de los

vehículos de esta índole como pueden ser la producción del hidrógeno o la infraestructura necesaria para adoptar esta tecnología.



Figura 10. *Prototipos Iniciativa Airbus ZEROe 2035 [18]*

4. CONCLUSIONES

La adopción de tecnologías de hidrógeno en el transporte público ofrece varios beneficios significativos:

- **Reducción de Emisiones:** Los vehículos que utilizan pilas de combustible de hidrógeno no emiten gases contaminantes, solo vapor de agua, contribuyendo a la reducción de la contaminación del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es especialmente relevante en áreas urbanas donde la calidad del aire es una preocupación.
- **Mayor Autonomía y Rapidez de Recarga:** Comparados con los vehículos eléctricos a batería, los vehículos de hidrógeno, dependiendo del modo de transporte, tienden a tener una mayor autonomía y tiempos de recarga mucho más cortos. Esto los hace atractivos para aplicaciones de transporte público que requieren un uso intensivo, como autobuses, trenes y *ferries*. Actualmente la evolución de baterías está reduciendo esta ventaja.
- **Versatilidad y Escalabilidad:** El hidrógeno puede ser producido a partir de diversas fuentes, incluyendo energías renovables, lo que permite escalabilidad y adaptación a diferentes contextos. Además, las pilas de combustible tienen aplicaciones en diversos tipos de transporte público, desde autobuses hasta

trenes y barcos, y, mucho más importante, han demostrado su viabilidad técnica en gran cantidad de proyectos.

- **Fomento de la Innovación Tecnológica:** El crecimiento del uso de hidrógeno en el transporte público puede impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías y modelos de negocio, promoviendo la innovación en la industria del transporte y la energía.
- **Diversificación de las Fuentes de Energía:** Al depender menos de los combustibles fósiles, el uso del hidrógeno en el transporte público ayuda a diversificar las fuentes de energía. Esto puede contribuir a una mayor independencia energética y reducir la vulnerabilidad a fluctuaciones en los precios del petróleo y el gas.
- **Potencial de Almacenamiento de Energía:** El hidrógeno puede funcionar como un vector energético, permitiendo almacenar energía producida por fuentes renovables como la solar y la eólica. Esto puede ser útil para equilibrar la oferta y la demanda energética, especialmente en sistemas de transporte público que operan durante largos periodos.

A pesar de sus beneficios, el uso del hidrógeno en el transporte público enfrenta varios desafíos:

- **Infraestructura de Producción y Distribución:** La producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno requiere infraestructura especializada, que actualmente es limitada. El costo y el tiempo para desarrollar esta infraestructura pueden ser significativos, afectando la viabilidad económica del hidrógeno como alternativa.
- **Costos de Producción de Hidrógeno:** La producción de hidrógeno verde, que utiliza fuentes de energía renovable, es actualmente más costosa que la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Este costo adicional puede ser un obstáculo para su adopción generalizada.
 - **Eficiencia y Competitividad:** Aunque las pilas de combustible de hidrógeno ofrecen mayor eficiencia en algunos aspectos, su competitividad con respecto a otras tecnologías, como los vehículos eléctricos a batería, sigue siendo cuestionada. La inversión inicial y los costos de operación pueden ser más altos.
- **Seguridad y Regulaciones:** El almacenamiento en tanques de almacenamiento a alta presión y transporte de hidrógeno implica riesgos de seguridad que requieren regulaciones estrictas y medidas de seguridad adicionales. La aceptación pública y la creación de normativas adecuadas son esenciales para su adopción.

El uso de hidrógeno en el transporte público presenta una alternativa prometedora para avanzar hacia un futuro más sostenible y reducir las emisiones del sector del transporte. Los beneficios de esta tecnología, como la reducción de emisiones y la mayor autonomía, son significativos. Sin embargo, para lograr una adopción

generalizada, es necesario abordar los desafíos relacionados con la infraestructura, los costes de producción, la eficiencia y la seguridad.

En conclusión, el hidrógeno puede desempeñar un papel crucial en la descarbonización del transporte público, pero su éxito dependerá de la inversión en infraestructura, la investigación para mejorar la eficiencia y la colaboración entre el sector público y privado para crear un ecosistema adecuado para el crecimiento de esta tecnología. La transición hacia el uso de hidrógeno en el transporte público puede ser un proceso gradual, pero con el apoyo adecuado, tiene el potencial de revolucionar la industria y contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a mis compañeros de INNOVAUTO por el esfuerzo, tiempo y trabajo dedicado durante estos meses, y, especialmente a la tutora Blanca Arenas, que ha sido la que nos ha guiado y ha permitido enfocar el trabajo de todos en la misma dirección. De la misma manera, esto no habría sido posible sin esta escuela, ni esta universidad, cuyo prestigio y reconocimiento permiten dar a conocer estos eventos, invitando a representantes de ilustres empresas como los que están el día de la presentación. Por último, agradecer a todo alumno o no que haya asistido al evento y a toda persona tanto de dentro como de fuera de la escuela que haya puesto de su parte para sacar adelante esto cada año.

6. REFERENCIAS

- [1] Equipo editorial, Etecé (8 de septiembre 2019). *Historia del automóvil*. Enciclopedia Humanidades. <https://humanidades.com/historia-del-automovil/>
- [2] Statista. (2024) [Gráfico de barras]. Extraído de: Statista. <https://www.statista.com>
- [3] Centro Nacional de Hidrógeno (2024). *El Hidrógeno*. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [4] H2SYS. Hydrogen (2021). *Pila de combustible*. <https://acortar.link/qX24uY>
- [5] Linseis. (2024). *Tecnología del Hidrógeno*. <https://www.linseis.com/es/aplicaciones/tecnologia-del-hidrogeno/>
- [6] David Solero Rico. (16 de julio 2019). *Producción de hidrógeno*. Ariema. <https://www.ariema.com/produccion-de-h2>
- [7] Agencia Internacional de Energía (IEA). (2022). *Informe Anual de la Agencia Internacional de Energía*. <https://www.iea.org/>
- [8] Emilio de las Heras. (2024). *La UE quiere reducir el 90% de sus emisiones en 2040*. Blog Expansión. <https://www.expansion.com/blogs/cambioclimatico/2024/02/07/la-ue-quiere-reducir-el-90-de-sus.html>

-
- [9] Gasnam (2023). *Mapa de estaciones de gas natural e hidrógeno*. <https://gasnam.es/mapa-estaciones-gas-natural-hidrogeno/>
 - [10] Comisión Europea. (2006). *Clean Urban Transport for Europe*. Final Report. https://trimis.ec.europa.eu/system/files/project/documents/20090917_155253_20956_CUTE%20-%20Final%20Report.pdf
 - [11] David Nuevo. (2024). *El autobús de hidrógeno está en toda España*. <https://eshidrogeno.com/autobus-hidrogeno-madrid/>
 - [12] EMT MADRID. (2024). *La hidrogenera de EMT en Entrevías estará lista para entrar en funcionamiento a finales de 2023*. <https://www.emtmadrid.es/Noticias/La-hidrogenera-de-EMT-en-Entrevias-estara-lista-pa.aspx>
 - [13] Adif. (2023). *El tren demostrador del proyecto FCH2RAIL, primer tren de hidrógeno que circula en pruebas en la red ferroviaria española*. <https://www.adif.es/-/circulacion-primer-tren-hidrogeno-linea-zaragoza-canfranc>
 - [14] Talgo (2024). *Una decena de empresas españolas se alían para adaptar por primera vez la propulsión de hidrógeno a un tren de alta velocidad*. <https://www.talgo.com/es/-/himpulso-decenas-empresas-espanolas-hidrogeno-tren-alta-velocidad>
 - [15] Álvaro Escobar. (2022). *Fracaso estrepitoso del tren de hidrógeno, Alemania se replantea la decisión*. Autobild. <https://www.autobild.es/noticias/fracaso-estrepitoso-tren-hidrogeno-alemania-replantea-decision-1151693>
 - [16] Energy Report. (2024). *Cómo funciona el barco Energy Observer, el primero en navegar con su propio hidrógeno*. <https://www.ambito.com/energia/como-funciona-el-barco-energy-observer-el-primero-navegar-su-propio-hidrogeno-n5956058>
 - [17] Juan A. Oliveira. (2021). *El MF Hydra, el primer ferry propulsado por hidrógeno, Ship of the Year del 2021 en Noruega*. Va De Barcos. <https://vadebarcos.net/2021/09/25/el-mf-hydra-el-primer-ferry-propulsado-por-hidrogeno-ship-of-the-year-del-2020-en-noruega/>
 - [18] AIRBUS. (2024). *ZEROe*. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>

X INNOVAUTO

Descarbonización del transporte. Retos y alternativas

BLOQUE I:

Combustibles renovables: biocombustibles, combustibles sintéticos e hidrógeno

1. Biocombustibles: tipos, materias primas y tecnologías de producción.
Por Jacobo Garrido Delgado
2. Tecnologías y experiencias de instalaciones de captura de CO₂ de la atmósfera.
Por Lucas San José Alarcón
3. Requerimientos de los motores de combustión interna para el uso eficiente de biocombustibles.
Por Guillermo San Antolín Anaya

BLOQUE II:

Ámbitos y experiencias de utilización de combustibles renovables

4. Combustible renovable en el transporte pesado. Presente y retos futuros.
Por Juan Pedro Tabera Martín
5. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte pesado de mercancías.
Por Eduardo Moya García
6. Experiencias de utilización de hidrógeno en vehículos de transporte público de personas.
Por Javier Arias Buzunáriz

INSIA-UPM

Campus Sur UPM

Carretera de Valencia (A3) km.7

28031 Madrid (España)

Teléfono: 0034 91 0678850

Web: insia-upm.es

