



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada
para vehículos de transporte terrestre de mercancías.
Proyecto de una metodología para empresas del sector.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial (Acceso desde Grado
I. Mecánica)

AUTOR/A: Lloret Llinares, Miguel

Tutor/a: Tinaut Fluixá, Francisco Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE
PROPULSIÓN DESCARBONIZADA PARA
VEHÍCULOS DE TRANSPORTE TERRESTRE
DE MERCANCÍAS. PROYECTO DE UNA
METODOLOGÍA PARA EMPRESAS DEL
SECTOR

Trabajo Final del Máster en Ingeniería Industrial

Autor

Miguel Lloret Llinares

Tutor

Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Fecha

Curso académico 2023-2024

RESUMEN

Con el objetivo de mejorar la sostenibilidad en el transporte terrestre de mercancías, en el presente trabajo se analizan y comparan las diferentes alternativas para sistemas de propulsión que contribuyen a la descarbonización del sector del transporte terrestre de mercancías. Dentro de estas alternativas se incluyen biocombustibles, combustibles sintéticos, gas natural, hidrógeno (en motores y en pilas de combustible) y electricidad, comparándolos con la referencia de un motor con combustible diésel. Esta comparación incluye una evaluación de diversos aspectos, como son el nivel de emisiones de CO₂ y el consumo de energía durante todo el ciclo de vida del vehículo y del combustible. Para poder llevar a cabo estos cálculos, se ha hecho uso de los conceptos Well-to-Tank y Tank-to-Wheel, al igual que se han consultado diversas instituciones y documentos oficiales, como son el JEC (JRC-Eucar-Concawe) o el MITMA. Se consideran las variaciones de peso y/o volumen asociadas a las distintas alternativas de propulsión, sobre todo en el almacenamiento (baterías, hidrógeno a presión). Igualmente, se considera la repercusión que tienen los costes de los combustibles y electricidad, así como los de inversión y de mantenimiento.

Se pretende que este trabajo sirva como una guía sostenible para las empresas y usuarios del sector, comparando cuantitativamente las diferentes alternativas a la propulsión tradicional. De este modo, en función de las preferencias y/o recursos del futuro comprador, se podrá elegir el sistema de propulsión alternativo que más se ajuste a su perfil, contribuyendo a la descarbonización de la actividad de una forma más sencilla.

Palabras clave: emisiones CO₂; consumo combustible; descarbonización; transporte de mercancías; hidrógeno; propulsión eléctrica; e-fuel

ABSTRACT

With the aim of improving sustainability in land freight transport, this paper analyses and compares the different alternatives for propulsion systems that contribute to the decarbonization of the land freight transport sector. This comparison includes an evaluation of various aspects, such as the level of CO₂ emissions and energy consumption during the entire

life cycle of the vehicle and fuel. In order to carry out these calculations, the Well-to-Tank and Tank-to-Well concepts have been used, and various institutions and official documents, such as the JEC (JRC-Eucar-Concawe) or MITMA, have been consulted. Weight and/or volume variations associated with the different propulsion alternatives are considered, especially in storage (batteries, pressurized hydrogen), as well as the impact of fuel and electricity costs, investment and maintenance costs.

This work is intended to serve as a sustainable guide for companies and users in the sector, quantitatively comparing the different alternatives to traditional propulsion. In this way, depending on the preferences and/or resources of the future buyer, it will be possible to choose the alternative propulsion system that best fits his profile, contributing to the decarbonization of the activity in a simpler way.

Keywords: CO2 emissions; fuel consumption; decarbonization; freight transport; hydrogen; electric propulsion; e-fuel

RESUM

Amb l'objectiu de millorar la sostenibilitat en el transport terrestre de mercaderies, en el present treball s'analitzen i es comparen les diferents alternatives per a sistemes de propulsió que contribueixen a la descarbonització del sector del transport terrestre de mercaderies.

Dintre d'aquestes alternatives s'inclouen biocombustibles, combustibles sintètics, gas natural, hidrògen (en motors i en piles de combustible) i electricitat, comparant-los amb la referència d'un motor amb combustible dièsel. Aquesta comparació inclou una avaluació de diversos aspectes, com són el nivell d'emissions de CO₂ y el consum d'energia durant tot el cicle de vida del vehicle i del combustible. Per a poder dur a terme aquests càlculs, s'ha fet ús dels conceptes Well-to-Tank i Tank-to-Well, al mateix temps que s'han consultat diverses institucions i documents oficials, com són el JEC (JRC-Eucar-Concawe) o el MITMA. Es consideren les variacions de pes i/o volum associades a les distintes alternatives de propulsió, sobre tot l'emmagatzematge (bateries, hidrògen a pressió). Igualment, es considera la repercussió que tenen els costos dels combustibles i electricitat, així com els d'inversió i de manteniment.

Es pretén que aquest treball pugua representar una guia sostenible per a les empreses i usuaris del sector, comparant qualitativament les diferents alternatives a la propulsió tradicional. D'aquesta manera, en funció de les preferències i/o recursos del comprador, es podrà elegir el sistema de propulsió alternatiu que més s'ajuste al seu perfil, contribuint així a la descarbonització de l'activitat d'una forma més senzilla.

Paraules clau: emissions CO₂; consum de combustible; descarbonització; transport de mercaderies; propulsió elèctrica; e-fuel.

Índice

RESUMEN	II
ABSTRACT	II
RESUM	III
Índice	IV
Índice de ilustraciones	VI
Índice de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos del trabajo	1
1.3. Alcance del trabajo	2
1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU	3
2. Alternativas de propulsión para camiones	5
2.1. Posibles combinaciones de motores-combustibles y de almacenamiento de energía a bordo	5
Sistemas de propulsión alimentados con combustibles líquidos y derivados	7
Sistemas de propulsión alimentados con combustibles gaseosos y derivados	9
Sistemas de propulsión eléctricos	11
2.2. Consumos de energía y emisiones de CO2 asociadas a las transformaciones energéticas de los combustibles	15
3. Descripción de los vehículos de transporte de mercancías terrestres	18
3.1. Marco normativo en España	18
3.2. Camiones equipados con MCIa alimentado con Diésel, Biodiésel o e-Fuel	20
3.3. Camiones eléctricos a batería	22
3.4. Camiones de hidrógeno con pila de combustible	25
3.5. Camiones dual-fuel	29
3.6. Camiones con MCIa alimentado con GNC / Biometano / GNL	30
3.7. Camiones con MCIa alimentados con H2	32
3.8. Resumen de datos relevantes de entrada para los cálculos	33
4. Variables necesarias para la evaluación de las alternativas de propulsión para los camiones	36
4.1. Caracterización del recorrido de referencia	36
4.2. Estimación de la energía necesaria para impulsar el camión	37

4.3.	Consumos de energía y emisiones de CO ₂ en la etapa W-T-T	39
4.4.	Potencias y energías específicas de los sistemas de propulsión	42
4.5.	Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento	44
4.6.	Emisiones de CO₂ en la fabricación del vehículo	44
4.7.	Costes específicos de los elementos de los sistemas de propulsión	48
5.	Comparación de las alternativas de propulsión	50
5.1.	Energía consumida por unidad de longitud en cada alternativa	50
	Energía necesaria en rueda para cada alternativa	50
	Rendimiento del tanque a la rueda (T-t-W).....	50
	Energía consumida en tanque.....	52
	Energía necesaria para producir el combustible	52
	Energía primaria consumida por unidad de longitud recorrida	53
5.2.	Emisiones de CO ₂ de cada alternativa.....	54
	Emisiones directas de CO ₂ (T-t-W)	54
	Emisiones totales de CO ₂ de cada alternativa (Well-to-Wheel)	55
	Emisiones totales de CO ₂ incluyendo la construcción del vehículo para cada alternativa	56
5.3.	Masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión y almacenamiento	58
5.4.	Costes de las distintas alternativas	61
6.	Conclusiones	65
6.1.	Conclusiones sobre las alternativas en los sistemas de propulsión.....	65
6.2.	Sugerencias para desarrollos futuros.....	68
7.	Bibliografía.....	69
	Presupuesto.....	71

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Objetivos de desarrollo sostenible	3
Ilustración 2. MCIA alimentado con diésel.....	8
Ilustración 3. MCIA alimentado con combustible sintético e-Diesel.....	8
Ilustración 4. MCIA alimentado con gas natural comprimido.....	9
Ilustración 5. MCIA alimentado con biometano.....	10
Ilustración 6. MCIA alimentado con hidrógeno.....	10
Ilustración 7. MCIA con alimentación de combustible dual.....	11
Ilustración 8. Pila de combustible alimentada con hidrógeno.....	12
Ilustración 9. Propulsión eléctrica con almacenamiento en batería.....	13
Ilustración 10. Hibridación en serie con MCIA y propulsión eléctrica.....	13
Ilustración 11. Transformaciones energéticas de los combustibles.....	16
Ilustración 12. Mercedes Actros diésel.....	21
Ilustración 13. Volvo FH diésel.....	21
Ilustración 14. Tesla Semi.....	23
Ilustración 15. Mercedes e-Actros 600.....	23
Ilustración 16. Volvo FH Electric.....	24
Ilustración 17. Camión eléctrico TEVVA 7,5 T.....	25
Ilustración 18. Quantron QHM FCEV.....	26
Ilustración 19. Distribución del sistema de propulsión Quantron QHM FCEV.....	26
Ilustración 20. Hyundai XCIENT Fuel Cell.....	27
Ilustración 21. Distribución del sistema de propulsión Hyundai XCIENT Fuel Cell.....	28
Ilustración 22. Mercedes Gen H2.....	29
Ilustración 23. Recarga de hidrógeno líquido en el Mercedes Gen H2.....	29
Ilustración 24. Camión modificado por West Port Fuel Systems en una hidrogenera.....	30
Ilustración 25. Volvo FH GNL.....	31
Ilustración 26. Iveco S-WAY GNL.....	32
Ilustración 27. Toyota GR Corolla H2 compitiendo en las 24h de Fuji 2023.....	33
Ilustración 28. Energía de la transformación W-t-T de cada combustible.....	40
Ilustración 29. Emisiones de CO ₂ W-t-T y T-t-W de los sistemas de propulsión.....	40
Ilustración 30. Mix eléctrico de Iberdrola Clientes (izquierda) y de generación nacional (derecha) en 2022.....	41
Ilustración 31. Tipos de hidrógeno en función de su proceso de obtención.....	42
Ilustración 32. Emisiones durante la fabricación de cada tipo de vehículo a partir de cálculos hechos con Greet.....	46
Ilustración 33. Energía necesaria en rueda (Wh/km) para cada sistema de propulsión.....	50
Ilustración 34. Comparación del rendimiento equivalente del sistema propulsivo T-t-W de cada sistema.....	51
Ilustración 35. Energía consumida en tanque vs. Energía necesaria en rueda para cada alternativa.....	52
Ilustración 36. Energía necesaria para la producción de cada tipo de combustible. Etapa W-t-T.....	53
Ilustración 37. Energía primaria W-T-W consumida por kilómetro recorrido.....	54
Ilustración 38. Emisiones directas (T-t-W) de cada alternativa de sistema de propulsión.....	55

Il·lustració 39. Emisiones W-t-W de cada alternativa.....	56
Il·lustració 40. Repercusión de las emisiones de la fabricación de cada tipo de sistema propulsivo a lo largo del recorrido durante la vida del vehículo.....	57
Il·lustració 41. Emisiones totales de cada tipo de vehículo expresadas en gramos por kilómetro recorrido durante la vida útil del vehículo.	58
Il·lustració 42. Masa de los diferentes sistemas de almacenamiento.....	60
Il·lustració 43. Volumen de los distintos sistemas de almacenamiento.....	61
Il·lustració 44. Precio de los combustibles a principios de 2024.....	62
Il·lustració 45. Coste del combustible expresado en euros por kilómetro recorrido durante la vida útil del vehículo.	62
Il·lustració 46. Costes de mantenimiento y combustible por kilómetro recorrido.	63
Il·lustració 47. Coste total para la propiedad de cada alternativa, expresado en euros por kilómetro.	64
Il·lustració 48. Representación cualitativa de las distintas alternativas frente a cada criterio. ..	66
Il·lustració 49. Representación cualitativa de la puntuación de cada criterio para cada una de las alternativas de propulsión.....	67

Índice de tablas

Tabla 1. Posibles combinaciones de sistemas de propulsión y combustibles / electricidad.	6
Tabla 2. MMA en España según el tipo de vehículo articulado de 4 ejes.	18
Tabla 3. MMA en España según el tipo de vehículo articulado de 5 ejes o más.	19
Tabla 4. MMA en España para transporte combinado según el tipo de vehículo articulado de 5 ejes o más.	19
Tabla 5. Resumen datos de entrada para realizar los cálculos necesarios para la comparativa.	35
Tabla 6. Valores de potencia específica de los distintos propulsores.	43
Tabla 7. Masas y volúmenes específicos de los diferentes sistemas de almacenamiento.	44
Tabla 8. Emisiones de CO2 en la fabricación de los elementos comunes del vehículo.	45
Tabla 9. Emisiones específicas generadas durante la fabricación de los elementos de los sistemas de propulsión.	46
Tabla 10. Coste específico de adquisición de cada tipo de motorización.	48
Tabla 11. Coste específico de adquisición de los elementos de los sistemas propulsivos.	48
Tabla 12. Resumen de costes y amortizaciones.	49
Tabla 13. Masas y volúmenes de los diferentes sistemas de almacenamiento.	59
Tabla 14. Evaluación cualitativa de las distintas alternativas bajo diferentes criterios.	65
Tabla 15. Coste de la Mano de Obra.	71
Tabla 16. Presupuesto Global.	71

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Hoy en día hay consenso entre prácticamente toda la comunidad científica de que hay un **problema ambiental**. Muchas de las actividades del ser humano generan emisiones contaminantes a un ritmo preocupante, comprometiendo nuestra existencia y la de generaciones futuras, ya que contribuyen a fenómenos como el calentamiento global. Es nuestra responsabilidad revertir esta situación.

Una de las actividades que más contribuye al calentamiento global es la **quema de combustibles fósiles**, que genera productos como el CO₂, uno de los responsables del problema. Una de las actividades industriales que generan más emisiones por la quema de combustibles fósiles es el transporte de mercancías. Por ello, en este trabajo se va a realizar una comparación entre las distintas alternativas para la propulsión de un vehículo de transporte terrestre de mercancías.

Con el objetivo de realizar un trabajo realista, que sea aplicable a la industria del transporte actual, se han consultado diversas fuentes de información para poder obtener las condiciones reales en la operación de estos vehículos. Con todos los datos de entrada confirmados, se han analizado diversos parámetros de cada alternativa de propulsión y se han comparado cualitativamente. Para llevar a cabo estos cálculos, se ha hecho uso de los conceptos Well-to-Tank y Tank-to-Well.

Como antecedentes próximos a este trabajo, aunque orientado a otro tipo de vehículos, cabe citar el trabajo *Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos en el Puerto de Valencia* [Chiralt, 2023].

1.2. Objetivos del trabajo

El Instituto Universitario de Investigación CMT-Clean Mobility & Thermofluids de la Universitat Politècnica de València tiene diversas líneas de trabajo paralelas en cuanto a descarbonización se refiere.

En el presente trabajo se va a explorar una de esas líneas más profundamente, como es la descarbonización en el transporte de mercancías terrestre.

El **objetivo global** del trabajo es explorar y evaluar en profundidad las distintas alternativas para la propulsión de vehículos de transporte terrestre de mercancías. Para ello, se realizará una exhaustiva comparación entre ellas a nivel de consumo de energía, rendimiento, emisiones, costes, etc.

Con el tratamiento de estos datos, se pretende finalmente poder determinar cuál es el camino más adecuado hacia la descarbonización del transporte de mercancías terrestre en función de diversos parámetros.

Como **objetivos específicos** que permiten alcanzar el objetivo global, se encuentran los siguientes:

- Plantear las diversas alternativas para los sistemas de propulsión de los vehículos de transporte terrestre de mercancías.
- Describir las características generales de cada una de las alternativas, así como el marco normativo de aplicación en España.
- Definir las variables relevantes y las condiciones de referencia para establecer la comparación entre las diversas alternativas.
- Evaluar los valores adecuados de las variables relevantes, como es entre otras la energía W-t-T necesaria para producir un combustible o la electricidad, la masa y el volumen necesarios para almacenar cada tipo de combustible o electricidad, o los costes asociados.
- Realizar la comparación de los resultados de cada alternativa de propulsión, en las condiciones establecidas y de acuerdo los criterios de: Masa y Volumen del sistema de almacenamiento (combustible más contenedor o batería eléctrica), Energía primaria consumida W-t-W por km, Emisiones totales de CO₂ W-t-W por km y Coste total para la propiedad por km.

Cabe decir que, durante todo el trabajo, para las emisiones solamente se tiene en cuenta el dióxido de carbono. Es evidente que no es la única sustancia perjudicial emitida, pero sí que es la principal responsable del calentamiento global y por ello es la única que se contabiliza a efectos de este trabajo.

Los datos utilizados para calcular las variables relacionadas con las transformaciones de los combustibles no se han obtenido en este trabajo, sino que se han obtenido a través de la última publicación **JEC Technical Reports WELL-TO-TANK del año 2020** [Prussi, 2020].

Los datos relacionados con costes, masas y volúmenes que no están referenciados han sido proporcionados por el Instituto CMT de la UPV.

1.3. Alcance del trabajo

El trabajo que se presenta está estructurado en seis capítulos que se detallan a continuación.

En el capítulo 1 (actual) se realiza una introducción del trabajo que se va a realizar. A lo largo del segundo capítulo se realiza una introducción y explicación de los posibles sistemas de propulsión, para luego hablar de las transformaciones que sufren los combustibles durante su fabricación y las consecuencias energéticas y ambientales que estas provocan.

El capítulo 3 es una presentación de los vehículos reales que equipan los sistemas de propulsión descritos en el capítulo 2. Esta presentación incluye datos clave de cada tipo de propulsión, que representarán los datos de entrada para poder realizar los cálculos.

Durante el cuarto capítulo se enumeran, se explican y se estiman las variables clave que servirán para comparar los distintos sistemas de propulsión.

En el quinto capítulo tiene lugar la comparación y el análisis de estas variables para todos los sistemas de propulsión propuestos.

Finalmente, en el capítulo 6 se recogen las conclusiones generales y se hace una valoración final del proyecto.

1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

Los objetivos de desarrollo sostenible son el plan maestro desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para conseguir un futuro sostenible para todos. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia. Para no dejar a nadie atrás, es importante que se logre cumplir con cada uno de estos objetivos para 2030. En la Ilustración 1, se enumeran cada uno de estos 17 objetivos de desarrollo sostenible:



Ilustración 1. Objetivos de desarrollo sostenible

El presente trabajo, tal y como se ha explicado en los capítulos anteriores, pretende ser una herramienta que ayude en la tarea de descarbonización del transporte terrestre. Mediante la comparación de las distintas alternativas de propulsión que existen, busca ser una guía que pueda ser utilizada por las distintas empresas del sector para definir su hoja de ruta de cara a conseguir la descarbonización de la actividad.

Teniendo esto en cuenta, se puede considerar que el trabajo contribuye directamente a la consecución de algunos de estos 17 objetivos de desarrollo sostenible. A continuación, se detalla a qué objetivos y de qué forma contribuye el presente trabajo:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** A través de la exploración de las distintas alternativas para el sistema de propulsión, se determinarán las fuentes de energía más limpias y asequibles actuales y futuras.
- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** El objetivo final del presente trabajo es servir de guía para la renovación de los vehículos de transporte de mercancías por carretera, consiguiendo una movilidad más neutra en carbono que sea sostenible.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables.** Mediante este trabajo se pretende evolucionar hacia formas de movilidad más respetuosas con el medio ambiente, de modo que se reduzcan los consumos de energía.

- **ODS 13: Acción por el clima.** Como bien indica el título, se busca conseguir la descarbonización del sector del transporte de mercancías terrestre para alcanzar la sostenibilidad climática.

2. Alternativas de propulsión para camiones

En este capítulo se realiza un planteamiento general de las diversas alternativas para la propulsión de vehículos de transporte terrestre de mercancías, conocidos habitualmente como camiones. Para ello, se han utilizado referencias como los apuntes del Máster en Sistemas Propulsivos de la UPV [Tinaut, 2022], del Máster en Ingeniería de Automoción de la Universidad de Valladolid [Tinaut, 2020] o el estudio *Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine* [Ceballos, 2021]

2.1. Posibles combinaciones de motores-combustibles y de almacenamiento de energía a bordo

Existe una gran cantidad de sistemas de propulsión diferentes. Con la intención de poder presentarlos todos de forma que se obtenga una visión global y clara de ellos, se van a presentar en primer lugar los sistemas de propulsión propiamente dichos, y luego los combustibles con los que estos pueden funcionar.

Sistemas de propulsión disponibles:

- Sistemas **basados en motores de combustión interna alternativos (MCIA)**. Utilizan un combustible que se detona en su interior, convirtiendo la energía química contenida en el combustible en energía mecánica.
 - o A estos sistemas se les puede acoplar en paralelo un sistema de propulsión eléctrico para obtener una **hibridación en paralelo**.
- Sistemas **basados en pilas de combustible y motor eléctrico**. Utilizan el hidrógeno como vector energético para poder obtener electricidad a bordo. Luego esta electricidad se utiliza para alimentar un sistema de propulsión eléctrico.
- Sistemas **totalmente eléctricos**. Utilizan energía eléctrica almacenada en el vehículo para alimentar uno (o varios) motores eléctricos.
- Sistema **basado en un generador, que suele ser un MCIA, y un motor eléctrico**, obteniendo así una **hibridación en serie**.

Algunos de estos sistemas de propulsión pueden funcionar con diferentes combustibles, como lo son el diésel, biodiésel, gasolina, hidrógeno, gas natural, gasolina y diésel sintéticos, etc.

Para poder organizar mejor la información, en la Tabla 1 se relacionan los distintos sistemas de propulsión con los distintos combustibles. De este modo, se definen completamente las alternativas en la propulsión disponibles de una forma clara y concisa.

Tabla 1. Posibles combinaciones de sistemas de propulsión y combustibles / electricidad.

COMBUSTIBLE		SISTEMA DE PROPULSIÓN					
		MCIA-MEP	MCIA-MEC	Hibridación paralelo	Hibridación en serie	Pila de Combustible	Motor Eléctrico Con Batería
Diésel			1	x			
Biodiésel			2	x			
E-Fuel (Diésel)			3	x			
Gasolina		x		x			
E-Fuel (Gasolina)		x		x			
Bioetanol		x		x			
Biometano		4	?	x			
GNC		5	?	x			
GNL		6	?	x			
H2	Mix eléctrico	7		x		8.1	
	Electricidad renovable	x	x	x		8.2	
	Reformado	x	x	x		8.3	
H2-GNC	Mix Electricidad	9		x			
H2-Diésel	Mix Electricidad		10	x			
Electricidad	Mix Electricidad						11.1
	Electr. Renov.						11.2

A continuación, se explica el significado de los símbolos de la Tabla 1:

- “**x**”: significa que la **combinación** del sistema de propulsión-combustible es **posible**, pero no se va a tener en cuenta para este proyecto porque no se ajusta a los requerimientos.
- “**?**”: representa una **combinación novedosa y poca extendida** en la industria. Son motores de ciclo diésel pero que usan GN como combustible, aunque con matices: necesitan inyecciones piloto de diésel para poder iniciar la combustión. Son, por tanto, una mezcla entre MEC y MEP. Son novedosos porque hasta ahora el GN solamente se utilizaba en motores de encendido provocado.
- **Número**: representa una **combinación interesante para el presente trabajo** y, por tanto, se desarrolla a lo largo del trabajo.

Como se puede apreciar, hay una gran cantidad de alternativas posibles para la propulsión del vehículo.

Sin embargo, en primera instancia no se van a considerar todas ellas porque algunas pueden ser descartadas antes de siquiera empezar a realizar cálculos. Por ejemplo, todos los sistemas de propulsión que se basan en **MCIA pueden** combinarse con un sistema de propulsión eléctrico para **formar** una **hibridación en paralelo**. Sin embargo, aunque es cierto que se apreciarían mejoras en cuanto a rendimiento, en la misma dirección que la hibridación de un motor diésel, para la aplicación que se va a estudiar estas serían marginales. Por tanto, son alternativas que se han descartado de entrada.

Por otra parte, las que usan gasolina como combustible se descartan automáticamente. La razón es que los grandes motores de encendido provocado alimentados con gasolina para el transporte de mercancías no están desarrollados en Europa. En cambio, este tipo de motores sí que cubren una parte del mercado en otras partes del mundo, como sucede en Estados Unidos. Allí el precio bajo de este combustible lo hace posible, cosa que aquí no sucede.

Con todo esto, **quedan** un total de **14 alternativas** especialmente interesantes para la aplicación del transporte de mercancías por carretera. A lo largo de los siguientes apartados se van a

explicar más en profundidad cada una de las alternativas mencionadas, además de la interesante hibridación en serie y por qué no es adecuada para este proyecto.

Para estructurar las alternativas que se van a presentar a continuación, los diferentes sistemas de propulsión se han agrupado en función del combustible utilizado.

Sistemas de propulsión alimentados con combustibles líquidos y derivados

Por las razones comentadas anteriormente, **sólo se va a considerar el diésel o equivalentes como combustibles líquidos.**

*MCI*A alimentado con diésel / biodiésel

Este sistema de propulsión es el utilizado tradicionalmente en aplicaciones de transporte por carretera. Consiste en un motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión que utiliza gasóleo como combustible. Es un sistema profundamente desarrollado, con una gran autonomía, tiempos de recarga cortos, alta fiabilidad, facilidad de conseguir consumibles, alta potencia específica... pero con la desventaja de que genera demasiadas emisiones. Hoy en día se han desarrollado sistemas de postratamiento de gases que consiguen reducir en gran medida las emisiones, pero no son suficientes si se quiere llegar a una neutralidad en carbono en un futuro.

En este caso, el sistema puede funcionar con diésel, biodiésel o una mezcla de ambos. El biodiésel se considera un combustible renovable, ya que se genera a partir de desechos orgánicos. Por tanto, al incluirlo se mejoran las características contaminantes de esta alternativa de propulsión.

Este sistema, al igual que muchos otros, permite la hibridación en paralelo con un pequeño sistema de propulsión eléctrico. Esto es especialmente interesante en situaciones que requieren puntos de operación del motor muy distintos. De este modo, el sistema eléctrico es capaz de prestar apoyo al MCI en las situaciones que más perjudican su rendimiento.

Sin embargo, para la aplicación de transporte de larga distancia no tiene mucho sentido debido a que la mayor parte del tiempo el vehículo se encuentra circulando a velocidades estables por carretera. En esta situación, el sistema eléctrico no proporciona prácticamente apoyo y no influye apenas en la reducción del consumo y, por tanto, de las emisiones.

En la Ilustración 2, se muestra un esquema del sistema de propulsión descrito. En el recuadro difuminado en verde, se representa la **hibridación en paralelo como un paquete extraíble**, ya que puede incluirse o no. Como se ha comentado, en este trabajo quizá no sea tan interesante considerar la hibridación en paralelo, pero se va a presentar como una alternativa en todos los sistemas de propulsión en los que se pueda incluir.

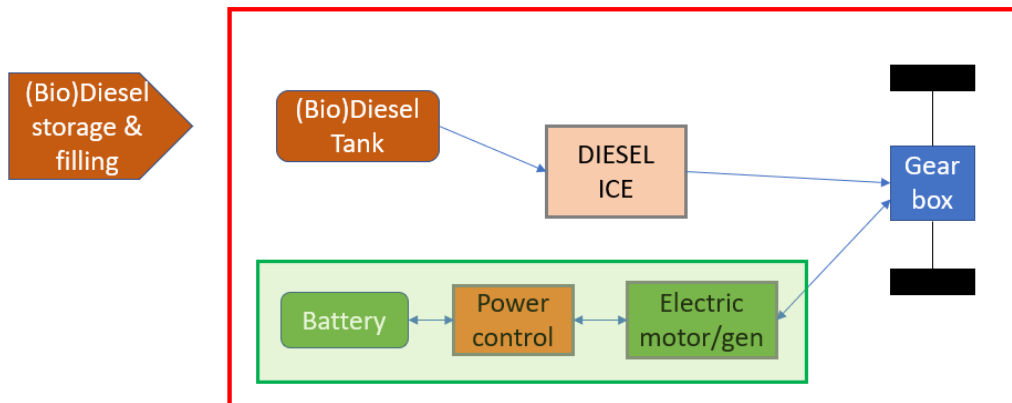


Ilustración 2. MCI alimentado con diésel.

MCI alimentado con diésel sintético (e-fuel)

El e-fuel es un combustible sintético obtenido a partir del carbono contenido en las moléculas de CO₂ de la atmósfera y del hidrógeno contenido en las moléculas de agua (H₂O). Con estos componentes y la aportación de electricidad (idealmente renovable) se consigue sintetizar un combustible con unas propiedades muy similares al diésel o a la gasolina, según el combustible que se quiera fabricar. De este modo, aunque en el proceso de combustión siga habiendo emisiones, estas no computan en el proceso global porque el CO₂ emitido es el mismo utilizado en la fabricación del combustible.

Por tanto, **es un sistema** de propulsión **tradicional** pero que utiliza **soluciones innovadoras** en lo referente al combustible. Al igual que un MCI alimentado con gasóleo cabe la posibilidad de hacer una hibridación en paralelo.

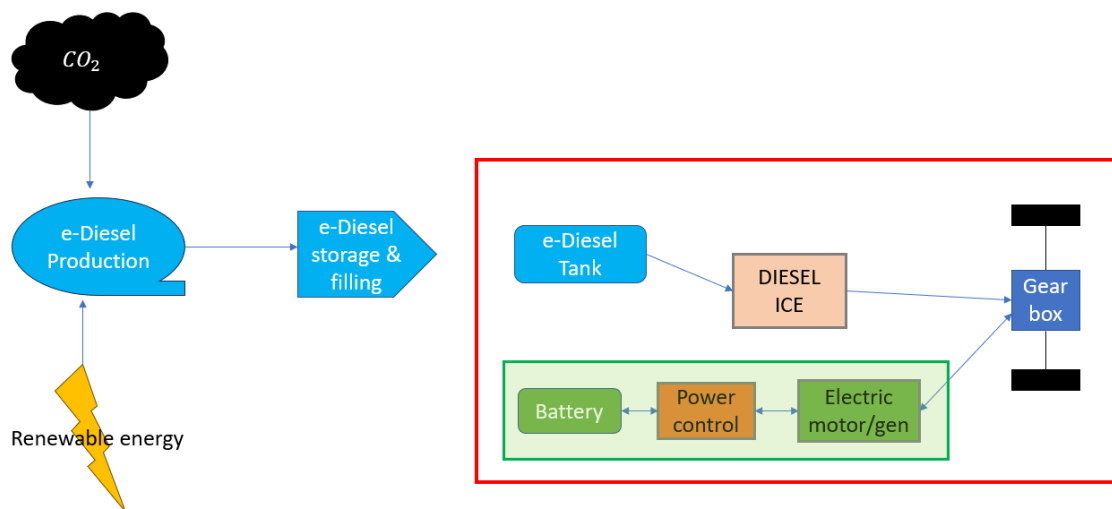


Ilustración 3. MCI alimentado con combustible sintético e-Diesel.

Sistemas de propulsión alimentados con combustibles gaseosos y derivados

Últimamente, los combustibles gaseosos están ganando cuota de mercado, pues presentan una ventaja medioambiental y su implantación es sencilla. Debido a su composición química generan menos emisiones contaminantes que los combustibles líquidos tradicionales. Además, pueden ser utilizados en motores tradicionales con unas pocas modificaciones. Estos detalles, junto con la facilidad de distribución y repostaje, contribuyen a su crecimiento.

MCIA alimentado con GNC / GNL

Este sistema de propulsión se basa en un motor de combustión interna alternativo de encendido provocado alimentado por **Gas Natural**. El GN es un combustible fácil de conseguir actualmente y a un precio **económico**, con la ventaja de que en su combustión se **producen menos emisiones** contaminantes que en la combustión del diésel. La diferencia entre el GNC y el GNL reside en el estado físico en el que se almacenan. Para el almacenamiento del GNC, este se comprime y se almacena a presión. Esto implica tener un sistema de almacenamiento presurizado y que puede almacenar menos energía que su homólogo diésel debido a la baja densidad del GN en comparación al gasóleo incluso estando presurizado. En el caso del **GNL**, el GN se encuentra en **estado líquido** ya que ha sido sometido a un proceso de licuefacción.

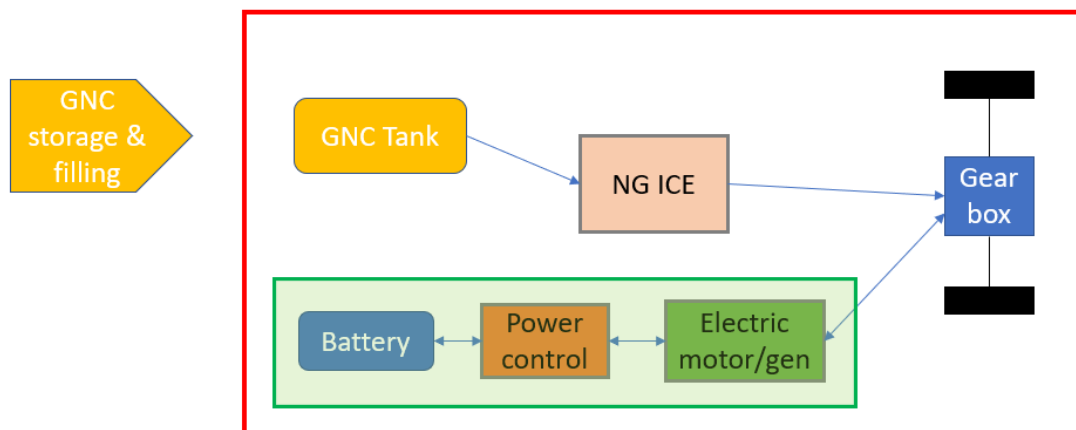
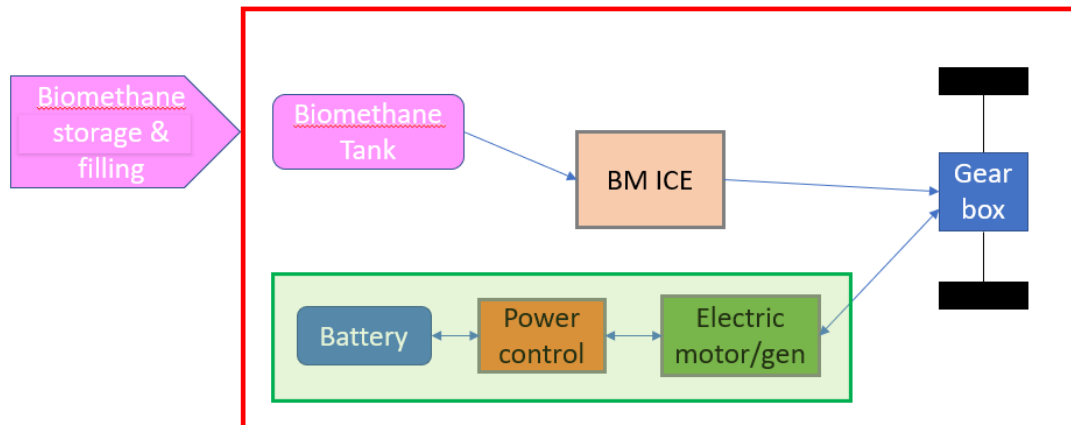


Ilustración 4. MCIA alimentado con gas natural comprimido.

MCIA alimentado con biometano

Del mismo modo que el anterior, este sistema de propulsión se basa en un MCIA alimentado con **biometano**, que es un gas con una proporción del **95% de metano** y de origen **renovable**. Es muy parecido al GN, con la salvedad de que tiene un origen renovable. El metano es un combustible más limpio que el diésel debido a que su contenido en carbono es menor y produce menos dióxido de carbono. El esquema de funcionamiento del sistema de propulsión es el que se muestra en la Ilustración 5:



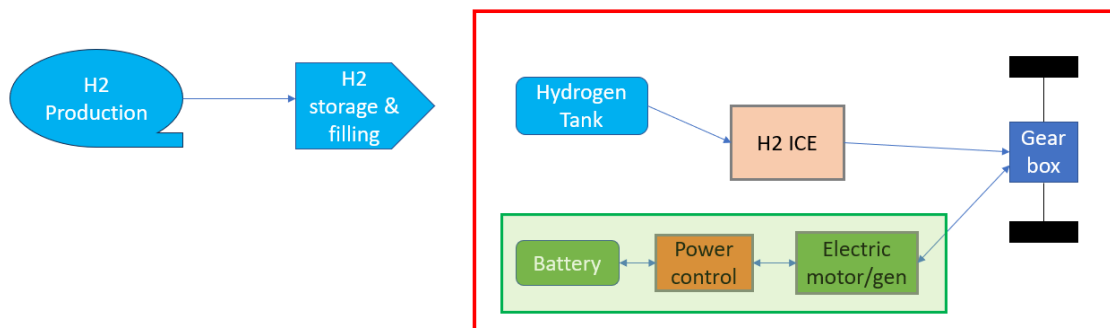
Il·lustració 5. MCIA alimentado con biometano.

El biometano es biogás tratado para eliminar impurezas, como por ejemplo el CO₂, para que su composición tenga el mayor contenido de metano. El biogás, por su parte, se produce a partir de la descomposición de restos orgánicos (residuos agrícolas, ganaderos, lodos de depuradoras, etc.) mediante una digestión anaerobia. Tras esta digestión, y gracias a la acción de las bacterias, se genera un gas principalmente compuesto por metano y dióxido de carbono.

Por tanto, se trataría de un sistema de propulsión de un MCIA alimentado con GN de origen renovable.

MCIA alimentado con H₂ puro

Este sistema de propulsión se compone de un motor de combustión interna alternativo alimentado con hidrógeno. El hidrógeno es un combustible con un elevado poder calorífico además de que tiene una característica especialmente interesante de cara a la descarbonización: se compone de 2 átomos de hidrógeno, por lo que **no contiene carbono que** tras la combustión **pueda convertirse en CO₂**. Por tanto, también se considera como un combustible que **no genera emisiones**.



Il·lustració 6. MCIA alimentado con hidrógeno.

MCIA alimentado con mezclas de H2 (con Diésel y GN)

Los sistemas de propulsión basados en motores de combustión duales son aquellos en los que **un mismo motor** funciona con una mezcla de **dos combustibles diferentes**. Al introducir un combustible más limpio a la mezcla, se reducen las emisiones que si solamente se utilizara diésel o gasolina. Todo esto sin tener que realizar grandes cambios respecto a un MCIA diésel, lo que implica poca inversión, y teniendo la misma disponibilidad, tiempo de recarga, costes que un MCIA diésel tradicional. Esta alternativa es, por tanto, una forma rápida y barata de reducir las emisiones mientras que se desarrollan lo suficiente otras alternativas más respetuosas con el medio ambiente. Es una especie de “puente” hacia la que será la movilidad del futuro. El esquema de funcionamiento es el representado en la Ilustración 7. Podría realizarse una hibridación en serie, al igual que en otros sistemas, pero ni siquiera se ha considerado porque al tener 2 sistemas de almacenamiento distintos, el espacio disponible es muy reducido.

Al introducir un porcentaje de H2 al combustible, disminuyen en gran medida las emisiones de CO2.

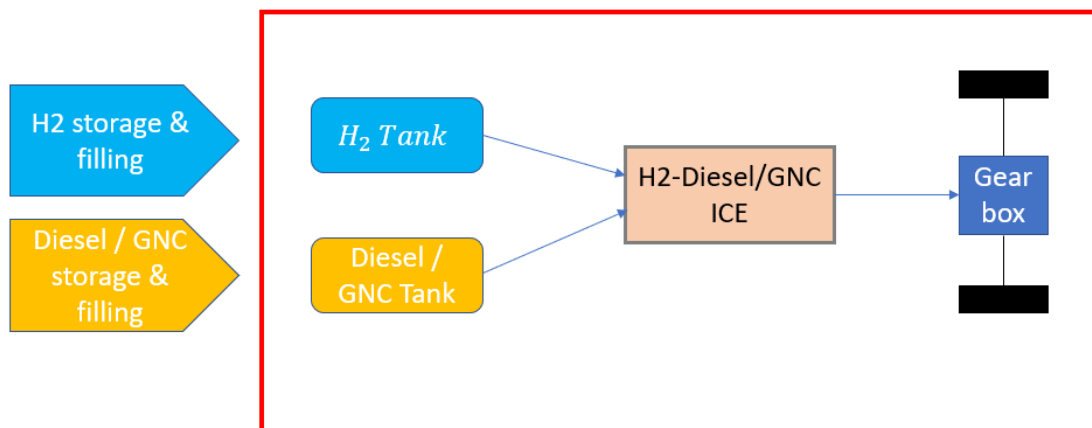


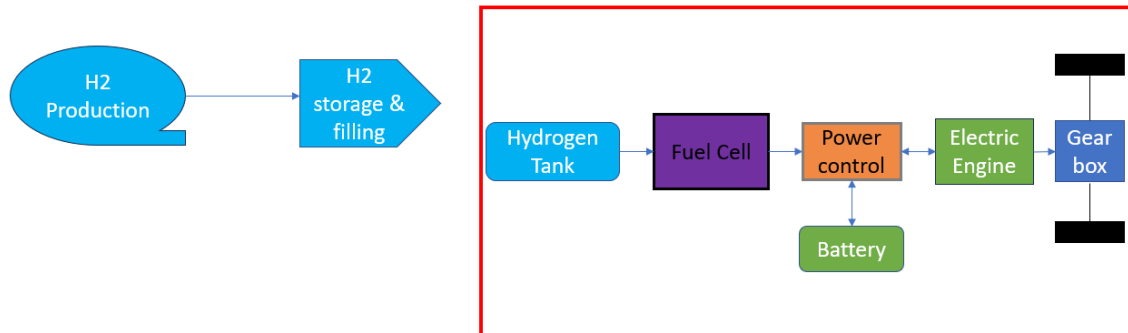
Ilustración 7. MCIA con alimentación de combustible dual.

Sistemas de propulsión eléctricos

Estos sistemas se caracterizan por que la **energía mecánica** en rueda se consigue gracias a la acción de un **motor eléctrico**. Dentro de estos sistemas de propulsión, se encuentran 3 alternativas: Pila de combustible alimentada con H2, Almacenamiento de la energía eléctrica en baterías y Generación de electricidad a bordo mediante un generador accionado por un motor de combustión interna.

Pila de combustible alimentada con H2

Este sistema de propulsión utiliza **hidrógeno como vector energético**. El hidrógeno almacenado en los tanques del vehículo se utiliza para obtener electricidad mediante una pila de combustible. Esta electricidad se utiliza para mover el vehículo y/o cargar una batería que la almacene para que pueda ser utilizada por el motor cuando se requiera.



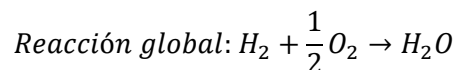
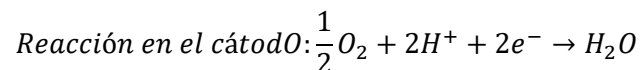
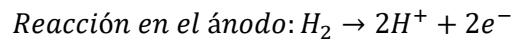
Il·lustración 8. Pila de combustible alimentada con hidrógeno.

Una **pila de combustible** es un dispositivo electroquímico que es capaz de **transformar**, de forma directa, **energía química** en **energía eléctrica**. Se alimenta con un combustible (que es el hidrógeno) y un comburente (que es el oxígeno del aire), y se obtiene agua, calor y electricidad en forma de corriente continua.

Una pila de combustible, de forma general y simplificada, se compone de tres partes:

- Electrodo. Se diferencian el ánodo (donde se reduce el H₂ en 2 protones H⁺) y el cátodo (donde reaccionan los protones H⁺ y el O₂)
- Electrolito. Se encarga de separar los gases, permite el paso de iones H⁺ y separa los electrones.
- Placas bipolares. Son “las barreras” que separan las celdas: conducen los gases y evacúan H₂O.

Las reacciones que se dan en la pila son las siguientes:



Aunque las pilas de combustible son elementos muy estudiados desde hace muchos años y son dispositivos muy avanzados, no son capaces de regularse tan rápidamente como lo requiere el transporte por carretera, por lo que necesitan una batería y un sistema de gestión de la energía para que el vehículo pueda responder a los transitorios fácilmente.

Propulsión eléctrica a batería

Este sistema de propulsión se caracteriza por utilizar una **batería** (generalmente de iones de litio) como sistema de almacenamiento de energía eléctrica que **alimenta** a un **motor eléctrico** conectado a la transmisión.

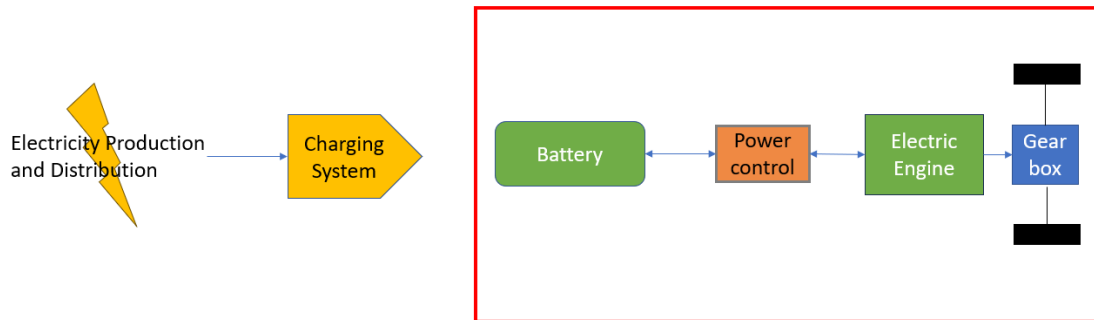


Ilustración 9. Propulsión eléctrica con almacenamiento en batería.

Propulsión eléctrica con un motor de combustión accionando un generador

Esta tipología de sistema de propulsión es muy interesante, pero en muy pocas ocasiones se ha empleado como solución para los vehículos de carretera. Consta de un motor de combustión que se conecta a un generador eléctrico. Este generador se encarga de cargar una batería que es la que suministra energía a un motor eléctrico que es el que va conectado a la transmisión del vehículo. El motor utilizado debe ser un motor compacto y ligero, por lo que hasta ahora se ha utilizado un MCI MEPA como generador. En la siguiente figura se esquematiza el funcionamiento de este sistema de propulsión:

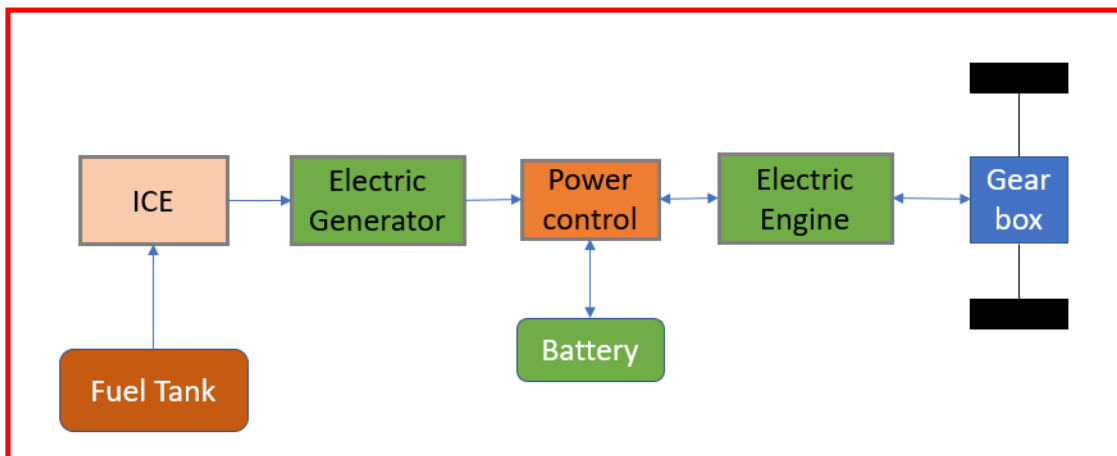


Ilustración 10. Hibridación en serie con MCI y propulsión eléctrica.

La hibridación en serie tiene por objetivo **hacer** que el **motor** de combustión interna siempre **trabaje** en la zona de **máximo rendimiento**, utilizándolo como un generador de electricidad que se almacena y se usa para impulsar el vehículo.

Desde el punto de vista del rendimiento, uno de los problemas de los sistemas de propulsión de MCI tradicionales es que el motor tiene una ventana de funcionamiento muy grande. El rendimiento del motor no se mantiene estable durante toda la ventana de funcionamiento, nada más lejos de la realidad. De hecho, el rendimiento máximo se encuentra sólo bajo unas condiciones de funcionamiento muy acotadas. De este modo, los requerimientos del vehículo hacen que el motor trabaje en la zona de máximo rendimiento solo durante una fracción del tiempo total que está funcionando, provocando que el rendimiento medio durante el funcionamiento sea bastante menor que el rendimiento máximo.

Una forma muy gráfica de ver cómo varía el rendimiento dentro de la ventana de funcionamiento del motor es la utilización de **curvas multiparamétricas**. Estas curvas sirven para evaluar como varían las magnitudes características de un motor en función del régimen de giro del cigüeñal y del grado de carga.

El consumo específico es una magnitud del motor directamente proporcional al consumo de combustible por unidad de longitud. Por tanto, el **rendimiento** será **máximo** si el **punto de funcionamiento** se sitúa sobre la **zona de menor consumo específico**. Como se puede apreciar, este punto ocupa una región muy pequeña en el mapa y solamente se alcanza a unas condiciones de funcionamiento muy específicas.

Además, **este punto** en un MCIA instalado en un vehículo de carretera **se va moviendo** continuamente **por toda la curva** multiparamétrica, estando sólo durante una fracción del tiempo de funcionamiento cerca del punto de menor gasto específico.

Normalmente, este punto óptimo suele diseñarse para que el vehículo esté cerca de él en las condiciones en las que puede estar más tiempo funcionando. En el caso de los camiones, se diseña para que se encuentre en las condiciones de funcionamiento de transporte por carretera (alto grado de carga, velocidad de 90km/h...). De este modo, se maximiza el rendimiento.

Sin embargo, hay multitud de factores que pueden condicionar el régimen de giro y grado de carga (meteorología, orografía, velocidad a la que se circula, transitorios...) haciendo que el motor funcione alejado de este punto de máximo rendimiento.

La razón de ser de un sistema de propulsión híbrido en serie es hacer que el MCIA funcione siempre en el punto de máximo rendimiento. De este modo, se obtiene una autonomía muy grande en comparación con un sistema de propulsión eléctrico con un tiempo de recarga muy pequeño, reduciendo los consumos y emisiones de un sistema de propulsión tradicional. Con todo esto, se consigue hacer un uso más responsable de los combustibles fósiles.

Por tanto, se puede considerar que el **ahorro** de combustible será mayor **en** aquellas aplicaciones en las que las **condiciones** de uso sean muy **cambiantes o exigentes mecánicamente**. Aquí, el punto de funcionamiento se moverá la mayor parte del tiempo en las zonas en las que el consumo específico de combustible es alto. Además, si el vehículo se encuentra circulando en lugares remotos, es especialmente difícil encontrar suministro de combustible que no sea gasóleo o gasolina.

De hecho, este sistema de propulsión se ha probado en un coche que reúne las características anteriormente mencionadas: el Audi RS Q e-tron E2, el coche de Carlos Sainz para correr el Dakar. Es una competición en un lugar remoto en la que el MCIA que llevan los coches suelen trabajar lejos del punto de funcionamiento óptimo.

Sin embargo, el transporte de mercancías por carretera de larga distancia es una aplicación en la que la mayor parte del tiempo el vehículo está circulando por vías rápidas, a una velocidad estable, con un grado de carga estable, etc. Además, los **motores** destinados a estas aplicaciones están **diseñados** para que con estas condiciones el **punto de funcionamiento** se sitúe **cerca del punto óptimo**. Por tanto, las ventajas de aplicar esta tecnología no serían lo suficientemente notables como para plantear esta alternativa de propulsión, ya que el rendimiento medio durante el transporte no es mucho menor que el rendimiento máximo del motor.

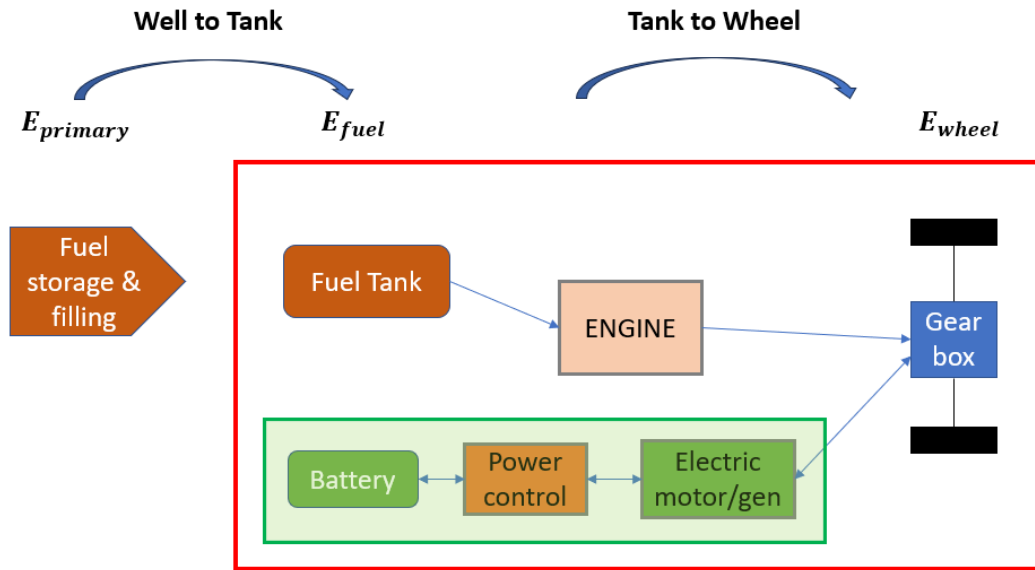
2.2. Consumos de energía y emisiones de CO₂ asociadas a las transformaciones energéticas de los combustibles

El movimiento de un camión (o de cualquier vehículo en general) se produce cuando se vencen las fuerzas de resistencia debidas a la fricción con el asfalto y con el aire (aerodinámica del vehículo).

Si se parte de la energía necesaria en la rueda, se puede obtener la energía que el sistema de propulsión debe proporcionar. Esto se consigue a través del rendimiento mecánico de la transmisión y los acoplamientos motor/rueda. Con la energía que el sistema de propulsión debe proporcionar, se puede obtener la energía necesaria en el tanque de combustible a través del rendimiento del motor. Cabe decir que este planteamiento es general y aplica a todo tipo de motores. En función del tipo de sistema de propulsión planteado el rendimiento y, por tanto, la energía necesaria en tanque, variarán. Con este planteamiento se puede obtener la energía consumida en los procesos **Tank-to-Wheel**, así como las **emisiones de CO₂ directas**. Este proceso se caracteriza, por tanto, por el rendimiento Tank-to-Wheel (η_{TW}).

Sin embargo, los diferentes combustibles necesitan una serie de transformaciones previas hasta poder ser utilizados en el tanque. Por tanto, previamente a su uso en el tanque han atravesado por una serie de procesos que generan emisiones y tienen un rendimiento menor del 100%. Por tanto, si se quiere hacer una comparativa real entre los distintos sistemas de propulsión, también se han de considerar las transformaciones previas de cada combustible. Para poder caracterizar estos procesos de producción de combustible o electricidad se tiene en cuenta el **rendimiento Well-to-Tank (η_{WT})**, así como las **emisiones de CO₂** generadas en cada proceso. De este modo, cuando se tienen en cuenta dichos procesos, se obtienen los **consumos totales de energía primaria y las emisiones totales de CO₂**.

En la Ilustración 11 Ilustración 11 se puede ver de forma gráfica lo que se ha comentado acerca de las transformaciones por las que pasa el combustible.



Il·lustració 11. Transformacions energètiques de los combustibles.

Para el presente trabajo, una forma conveniente de expresar los consumos de energía es en forma de **energía por unidad de longitud recorrida**, que es equivalente a la fuerza en las ruedas necesaria para vencer la resistencia a la rodadura, la aerodinámica y la subida de pendientes o la aceleración. Para un determinado vehículo, la energía consumida depende por ello mucho de la velocidad, de la masa arrastrada y de la orografía. Por tanto, los valores de consumo de energía por unidad de longitud que se usan a lo largo de este trabajo solamente serán válidos para el presente proyecto y serán dependientes de las condiciones del recorrido estudiado.

A continuación, se van a explicar las transformaciones hechas para poder utilizar las expresiones de energía y emisiones por unidad de longitud recorrida.

Considerando el **rendimiento Tank-to-Wheel** y la energía por unidad de longitud referida a la rueda, se puede obtener la energía por unidad de longitud referida al tanque:

$$(E/L)_{tank} = \left(\frac{(E/L)_{wheel}}{\eta_{TtW}} \right) = \left(\frac{Wh}{km} \text{ ó } \frac{J}{km} \right)$$

De la misma forma, se puede obtener la energía por unidad de longitud en términos de energía primaria si se considera el **rendimiento Well-to-Tank**:

$$(E/L)_{primaria} = \left(\frac{(E/L)_{Tank}}{\eta_{WtT}} \right) = \left(\frac{(E/L)_{Tank}}{\eta_{WtT} * \eta_{TtW}} \right) \left(\frac{Wh}{km} \text{ ó } \frac{J}{km} \right)$$

Por otra parte, las **emisiones de CO2 directas** se pueden obtener de la siguiente forma:

$$\left(\frac{eCO_2}{L} \right)_{TtW} \left(\frac{g}{km} \right) = eCO_2 \left(\frac{g}{Wh_{tank}} \right) * \left(\frac{E}{L} \right)_{tank} \left(\frac{Wh}{km} \right)$$

Donde $eCO_2 \left(\frac{g}{Wh_{tank}} \right)$ es el factor de emisión de cada combustible referido a la energía consumida del mismo. Cabe decir que este valor es cero para el hidrógeno y para la electricidad porque en ningún caso se producen emisiones directas con el uso de estos combustibles.

Para los combustibles renovables, como el biodiésel y los e-fuel también vale cero. En el caso de los e-fuels, estos se sintetizan con el carbono capturado de la atmósfera, por lo que su combustión no genera más CO₂ en el balance final. En el caso del biodiésel tampoco se contabiliza por su procedencia renovable.

Por tanto, las **emisiones totales de CO₂** referidas al **proceso global Well-to-Wheel** se deben calcular como la suma de las anteriores más las de los procesos Well-to-Tank:

$$\left(\frac{eCO_2}{L}\right)_{wtw} \left(\frac{g}{km}\right) = \left(\frac{eCO_2}{L}\right)_{ttw} + \left(\frac{eCO_2}{L}\right)_{wtT}$$

Donde

$$\left(\frac{eCO_2}{L}\right)_{wtT} \left(\frac{g}{km}\right) = eCO_{2wtT} \left(\frac{g}{Wh_{tank}}\right) * \left(\frac{E}{L}\right)_{tank} \left(\frac{Wh}{km}\right)$$

Y donde eCO_{2wtT} es el factor de emisión asociado a la producción de los combustibles y la electricidad. Este se debe determinar atendiendo a los distintos procesos de transformación utilizados. Se puede citar el documento **JEC Technical Reports WELL-TO-TANK del año 2020** como fuente para la obtención de estos valores. Es una fuente fiable avalada por distintas instituciones, por lo que se asegura la fiabilidad de los datos. Aunque parezca que el estudio es antiguo, es la última versión disponible. Estos estudios requieren el tratamiento de muchos datos, y suelen actualizarse cada 4 o 5 años, dejando así tiempo suficiente para que la tecnología se desarrolle y los cambios sean apreciables.

Cabe decir que el factor de emisión asociado a la producción es mayor que cero para todos los combustibles, incluidos tanto los renovables como la electricidad.

Estos valores totales de **energía consumida y emisiones de CO₂ Well-to-Wheel**, como suma de los procesos Well-to-Tank y Tank-to-Wheel, **son los que se deben usar** para poder comparar correctamente los sistemas de propulsión.

3. Descripción de los vehículos de transporte de mercancías terrestres

- En este capítulo se van a presentar los vehículos equipados con cada sistema de propulsión que se están comercializando o que están en fase de pruebas. De este modo, se pretende obtener diversos datos clave de cada alternativa (como pueden ser consumo o precio) en base a un estudio de mercado, para poder usarlos en los cálculos que se realizarán más adelante. Los datos que se van a presentar han sido obtenidos a partir de información de los propios fabricantes y de trabajos como el *Taller informativo sobre hoja de ruta de descarbonización* [Tinaut, 2023].

3.1. Marco normativo en España

Siempre que se habla del peso de un camión se habla de Masa Máxima Autorizada (**MMA**), que es la suma del peso de del vehículo vacío (**TARA**) más el **peso de la carga**, que incluye tanto el peso de las mercancías como las personas que viajan en el mismo.

El valor de MMA varía mucho en función del tipo de camión y el número de ejes que tenga.

Los camiones que son objeto de este trabajo son las cabezas tractoras que están destinadas a realizar trayectos de media y larga distancia. Quedan por tanto excluidos los camiones rígidos. Entre los camiones con semirremolque, también hay diferencias en la MMA en función de las características de la cabeza tractora y el semirremolque. A continuación, se muestran una serie de tablas en las que se especifica la MMA de cada tipo de camión semirrígido en función de sus características.

Tabla 2. MMA en España según el tipo de vehículo articulado de 4 ejes.

Vehículos articulados de 4 ejes	MMA en toneladas
Vehículo de motor de 2 ejes y semirremolque en el cual la distancia entre ejes sea igual o superior a 1,30 metros y sea inferior a 1,80 metros (2)	36
Vehículo de motor de 2 ejes y semirremolque en el cual la distancia entre ejes sea igual o superior a 1,80 metros	36
Vehículo de motor de 2 ejes, equipado en el eje motor con ruedas gemelas, suspensión neumática o reconocida como equivalente y por un semirremolque en el cual la distancia entre ejes sea superior a 1,80 metros, y se respeten la masa máxima autorizada del vehículo motor (18 toneladas) y la masa máxima autorizada de 1 eje tándem de semirremolque (20 toneladas)	38
Otros vehículos articulados de 4 ejes compuestos por un tractor de 2 ejes y un semirremolque de otros 2 ejes	36

- (1) Salvo cuando el semirremolque esté equipado con caja basculante reforzada para la utilización específica en construcción, obras o minería que será de 38 toneladas, siempre que la carga impuesta sobre el dispositivo de acoplamiento sea compatible con las masas máximas por eje establecidos en la tabla 1 del Real Decreto 2822/1998.

Tabla 3. MMA en España según el tipo de vehículo articulado de 5 ejes o más.

Vehículos articulados de 5 o más ejes	MMA en toneladas
Vehículo de motor con 2 ejes y con semirremolque de 3 ejes	40
Vehículo de motor con 3 ejes y con semirremolque de 2 o 3 ejes	40

Tabla 4. MMA en España para transporte combinado según el tipo de vehículo articulado de 5 ejes o más

Vehículos articulados de 5 o más ejes – Transporte Combinado	MMA en toneladas
Vehículo de motor con 3 ejes y con semirremolque de 2 o 3 ejes llevando, en transporte combinado, un contenedor o caja móvil cerrados, igual o superior a 20 pies y homologado (ISO) para el transporte combinado	44
Vehículo de motor con 2 ejes y con semirremolque de 3 ejes llevando, en transporte combinado, un contenedor o caja móvil cerrados, igual o superior a 20 pies y homologado (ISO) para el transporte combinado	42

NOTA: El término de **transporte combinado** se refiere a la situación en la que la movilidad de productos que se efectúa dentro de un mismo equipo de transporte. Se suele optar por el transporte combinado cuando las características de la ruta que tiene que seguir la mercancía obliga a utilizar **diferentes medios**, es decir, una combinación de tierra, mar y/o aire. Además, es un tipo de transporte intermodal, es decir que el movimiento de mercancías significa que siempre se efectúa en una misma unidad de carga. De este modo, conseguimos utilizar varias formas de transporte sin manipular las mercancías directamente en los traslados.

Como se ha podido apreciar, en lo referente al marco normativo, **se consideran** siempre los conjuntos de **camión más semirremolque**. Sin embargo, el objeto de este trabajo es el **sistema de propulsión**, que se aloja siempre **en la cabeza tractora**. Por tanto, la comparación que se va a realizar únicamente contemplará las cabezas tractoras, considerándose los semirremolques como elementos comunes. A pesar de esto, los semirremolques sí que se tendrán en cuenta para algunos cálculos marginales, como pueden ser las emisiones o energía usada en la fabricación.

Para realizar una correcta comparación, deberían utilizarse como datos de entrada los pertenecientes a camiones con las mismas características constructivas, pero con distinto sistema de propulsión. Sin embargo, en el mercado de los camiones articulados algunos de los sistemas propulsión que se van a comparar aún están en fase de pruebas y los modelos ejemplo puede que no tengan exactamente las mismas características. Es decir, se van a considerar **equivalentes o comparables** las cabezas tractoras que estén preparadas para arrastrar 36T, 40T o 44T en trayectos de larga distancia, independientemente de si tienen 2 o 3 ejes o si la autonomía es de 400 km o de 800 km. Se hace esta suposición para poder **obtener** unos **datos** de entrada (consumos, capacidades de almacenamiento de combustible, etc.) que sean extraídos **de un vehículo real y funcional**, y no sean estimaciones. Es una suposición que

introduce un cierto error, pero es pequeño y así se pueden utilizar datos de entrada de modelos reales.

Con todo esto claro, es el momento de presentar camiones con diferentes alternativas de los sistemas de propulsión.

Hay sistemas de propulsión que, aun siendo diferentes, pueden configurar el mismo tipo de vehículo final. Es el caso de:

- Diesel, biodiesel, e-fuel. Son camiones con MCI MEC alimentados con combustible líquido almacenados en tanques a presión atmosférica
- GNC, GNL, Hidrógeno. Son camiones con MCI MEP alimentados con combustible gaseoso (o licuado) almacenados en tanques presurizados (o no, en el caso del GNL).
- Pila de combustible. Son camiones con pilas de combustible de hidrógeno, tanques de hidrógeno presurizados y baterías de capacidad media.
- Eléctricos. Son camiones con uno o varios motores eléctricos y con grandes paquetes de baterías

A su vez, en los últimos tiempos se puede ver como una misma plataforma de un vehículo puede equiparse con distintos sistemas de propulsión. Esto tiene sentido desde el punto de vista de que el desarrollo de la plataforma del vehículo es lo que más recursos consume. De este modo, una sola inversión sirve para obtener distintos vehículos. Es algo muy frecuente en la fabricación de los vehículos.

3.2. Camiones equipados con MCI alimentado con Diésel, Biodiésel o e-Fuel

Los camiones equipados con MCI de ciclo Diésel **son los vehículos de transporte más comunes**, siendo mayoritarios tanto en número de ventas como en número de vehículos en circulación. El sistema propulsivo, como bien se ha explicado anteriormente, trata de un MCI alimentado por un combustible líquido, si bien este puede ser diésel convencional, biodiésel o e-fuel sustitutivo del diésel. A continuación, se presentan algunos de los modelos más representativos, con información tomada de las correspondientes páginas web, incluidas en el listado de Referencias.

- **Mercedes Actros (Ilustración 12)**. Se ofrece en distintas configuraciones de motorización (motores desde 7,7 litros hasta 15,6 litros de cilindrada) y número de ejes (2 o 3 ejes). Una motorización muy utilizada y sobradamente comprobada es la de 12,8 litros. Este motor, el OM471, se ofrece en distintos niveles de potencia. A través de una prueba de conducción real hecha por la revista Solocamión podemos obtener un dato de consumo medio con MMA de 40T: 31,84 L/100. Esta prueba se realizó con el motor mencionado de 12,8 litros con una potencia de 350 kW (476 CV).



Il·lustraci3n 12. Mercedes Actros di6sel.

- **Volvo FH.** Al igual que su rival el Actros, se ofrece en multitud de configuraciones de cabina y ejes, aunque con menos motorizaciones (todas de 12,8 L con niveles de potencia entre los 420 CV y los 540 CV). En la web [transporte3](#) () encontramos una prueba de conducci3n similar a la realizada con el Actros: recorrido similar, MMA de 40T y velocidad media similar. El consumo medio en esta prueba fue de 27,35 L/100 km.



Il·lustraci3n 13. Volvo FH di6sel.

Para los camiones alimentados con di6sel, adem6s de ejemplos comerciales como los que se han presentado, se tienen fuentes de informaci3n muy fiables. Un ejemplo es el del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. En su p6gina web se ofrece mucha informaci3n. Concretamente, se publica un estudio llamado "Observatorio de costes del transporte de

mercancías por carretera” publicado en abril del 2023, en el que se especifican los costes estimados para cada tipo de vehículo y tipología de transporte.

En este documento, se especifica que para los vehículos articulados de carga generales (con MMA de 40T) se estima un **consumo de 35,0 L/100 km**.

Como se puede apreciar, es un valor de consumo más alto que los presentados anteriormente, y tiene su justificación. En este estudio, se tienen en cuenta los consumos medios para la flota de camiones con semirremolque que circulan actualmente por España. Esta flota incluye tanto modelos nuevos como modelos más viejos, cuyos datos de consumo son peores que para los nuevos. Teniendo en cuenta que los modelos presentados incorporan la última tecnología disponible, tiene sentido que el consumo que declaran sea menor que el consumo medio para la flota camiones articulados en España.

Por tanto, vamos a tomar el dato de 35 L/100km proporcionado por el MITMA, ya que además es un dato consensuado con diversos organismos pertenecientes al sector de transporte de mercancías terrestre.

3.3. Camiones eléctricos a batería

Este sistema de propulsión quizá sea el **segundo más importante** en cuanto a ventas y proliferación en el mercado. Además, el futuro de las normativas anticontaminantes en Europa contempla en algún momento conseguir que las emisiones directas sean nulas.

Actualmente, de entre los sistemas de propulsión que pueden conseguir esto, el más accesible (con diferencia) es el eléctrico, de ahí que los fabricantes hayan invertido tanto en comercializar modelos eléctricos. Como el dato de capacidad de carga en este tipo de vehículos es preocupante, se aclara que todos los camiones que se van a presentar cuentan con una capacidad neta de carga de 22-24 toneladas.

- **Tesla Semi**. Quizá sea el más famoso de los que se van a presentar a continuación. No se conocen datos oficiales en cuanto a la capacidad de la batería, aunque sí que se sabe que el consumo medio de este Camión es de 1.7 kWh/milla. Traducido a km da un consumo de 1,1 kWh/km, es decir, 110 kWh/100 km. Esto, junto con una autonomía anunciada de hasta 500 millas (800 km), permite calcular aproximadamente la capacidad de la batería: 880 kWh. Es una batería muy grande. Todos estos datos, se supone que son con una MMA de 37 toneladas según la información de la web de la propia marca. En cuanto al precio, aunque aún no ha salido a la venta, se anuncia que parte de unos 140 000 euros. Es un precio demasiado contenido para esa capacidad de batería, y este y otros modelos como el Roadster están sufriendo retrasos, por lo que los datos puede que no sean muy fiables.



Il·lustració 14. Tesla Semi.

- **Mercedes e-Actros 600.** Esta es la segunda generación de la cabeza tractora eléctrica del grupo alemán. Mercedes aprovechó en el pasado su exitosa plataforma del Actros y la adaptó para poder cambiar el sistema de propulsión tradicional por uno eléctrico. En octubre de 2023 presentó la segunda generación, con notables cambios estéticos que lo hacen más eficiente y con una autonomía mejorada: 500 km con una sola carga. Esto se consigue gracias a la ampliación del paquete de baterías (en esta segunda generación pasa de 336 kWh a 621 kWh). Haciendo cálculos rápidos, sale un consumo de 124,2 kWh/100km. Todo esto con una potencia continua de 400 kW (536 CV) y una máxima de 600 kW (800 CV), dejando la capacidad neta de carga en 22T si la MMA es de 44T. Esta segunda generación no comenzará a fabricarse hasta el último trimestre del 2024, y no se sabe nada del precio aproximado que podrá tener.



Il·lustració 15. Mercedes e-Actros 600.

- **Volvo FH Electric.** Al igual que la marca alemana, la marca sueca aprovecha su excelente plataforma y le incorpora un sistema de propulsión eléctrico. Sin embargo, aún no se ha anunciado una segunda generación del camión sueco, por lo que los valores de autonomía no son tan buenos: 345 km con 540 kWh (capacidad bruta). En cuanto a la capacidad neta no se saben datos, pero en algunas pruebas Volvo ha conseguido realizar consumos de 110 kWh/100km. Quizá sea un dato un poco optimista viendo el consumo de sus rivales, pero es del mismo orden de magnitud. No se encuentran datos oficiales en cuanto al precio de la cabeza tractora.



Ilustración 16. Volvo FH Electric.

- **TEVVA Electric Truck.** Tevva es una marca británica que está desarrollando camiones rígidos para el transporte terrestre de mercancías. Estos camiones tienen una MMA de 7,5 T. Aunque no se trate de una cabeza tractora como tal, se dispone de mucha información sobre este vehículo a través de su página web y del CMT. Hay dos versiones de este camión: una básica con propulsión 100% eléctrica, y otra que incorpora una pila de combustible para ofrecer mayor autonomía. La autonomía de la versión básica es de 180 km, mientras que con la pila de hidrógeno se aumenta hasta los 435 km. En cuanto a capacidad de carga, se reduce de 2957 kg a 2718 kg, mientras que el volumen de carga no se ve afectado. Con esto, se puede apreciar que, con una plataforma bien desarrollada, la inclusión de una pila de combustible no debe suponer un sacrificio demasiado grande.



Il·lustració 17. Camió elèctric TEVVA 7,5 T.

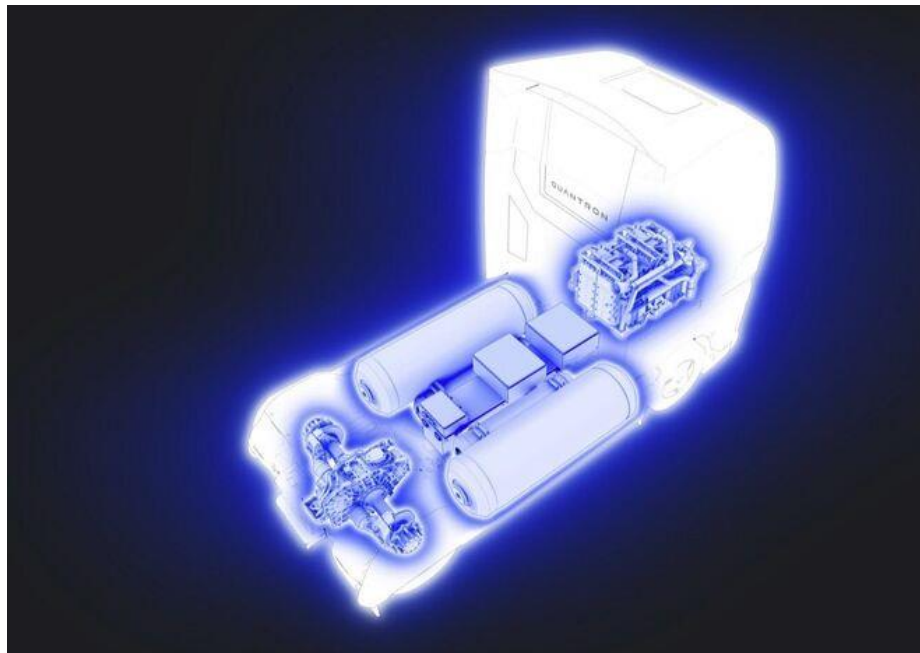
3.4. Camiones de hidrógeno con pila de combustible

Este sistema de propulsión está viendo en estos últimos años como las marcas invierten en desarrollar la tecnología necesaria para su implementación en el transporte por carretera. El motivo es sencillo: es un sistema de propulsión que no genera emisiones directas y puede llegar a ser muy apropiado para el transporte de larga distancia (si se desarrolla la tecnología apropiadamente). Los camiones eléctricos para conseguir más autonomía necesitan baterías más grandes, y las baterías son caras, difíciles de reciclar, lentas de recargar y muy pesadas (lo que reduce la capacidad de carga neta). Con este sistema, se incorpora un generador limpio (la pila de combustible) y una batería con capacidad reducida para completar el sistema de propulsión. Por tanto, se conseguiría una autonomía muy elevada, con tiempos de repostaje cortos. El problema principal es que el hidrógeno es muy difícil de obtener y de almacenar. El reto tecnológico para los próximos años es conseguir mejorar estos 2 aspectos. Teniendo en cuenta las bondades de este sistema de propulsión, muchas marcas están probando prototipos para poder mejorar la tecnología y sacarlos al mercado en los próximos años. De hecho, el único modelo que se comercializa en nuestro país es el Quantron QHM FCEV.

- **Quantron QHM FCEV.** Es el único modelo que se comercializa actualmente en España. Es fundamentalmente un MAN TGX reconvertido. Tiene 2 pilas de combustible de 120 kW cada una que alimentan una batería de 118 kWh. La potencia continua total de los motores eléctricos es de 400 kW con picos de 550 kW. Hay 2 versiones, con un tanque de 54kg o con un tanque de 122 kg de h₂, permitiendo autonomías de hasta 700 km y 1500 km, respectivamente. No hay información del precio de la cabeza tractora.



Il·lustraci3n 18. Qvantron QHM FCEV.



Il·lustraci3n 19. Distribuci3n del sistema de propulsi3n Qvantron QHM FCEV.

En la Il·lustraci3n 18 se puede ver el esquema de la distribuci3n de los diferentes componentes del sistema de propulsi3n. Como se puede observar, la pila de combustible ocupa el lugar que ocupar3a e MCI A, los motores el3ctricos se alojan directamente en la transmisi3n y los tanques de combustible ocupan el resto del veh3culo. Se ha decidido mostrar esta distribuci3n para apreciar la gran cantidad de espacio que ocupa este sistema de propulsi3n. Cada marca est3 intentando resolver este problema de espacio a su manera, por lo que las soluciones que se est3n proponiendo son muy diversas.

- **Hyundai XCIENT Fuel Cell.** Hay 2 versiones de este prototipo: un camión rígido y una cabeza tractora. El sistema de propulsión es compartido, misma pila de combustible y mismos motores eléctricos. La diferencia reside en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno. El camión rígido tiene 7 tanques y capacidad para 31 kg de H₂, mientras que la cabeza tractora tiene 10 tanques y capacidad para 68,6 kg H₂. En ambos sistemas, la presión de almacenaje en tanques es de 700 bar. Con esto se consigue una autonomía de 450 millas (724 km). El sistema de propulsión está formado por dos pilas de combustible de 90 kW cada una, un motor con una potencia de 350 kW y un paquete de baterías con una capacidad de 72 kWh. Haciendo cálculos rápidos, el prototipo de la cabeza tractora anuncia un consumo de alrededor de 9,5 kgH₂/100km. Este dato puede ser un tanto conservador según los datos proporcionados por el CMT, en los que se anuncian consumos de menos de 8kg de hidrógeno a los 100km.



Ilustración 20. Hyundai XCIENT Fuel Cell

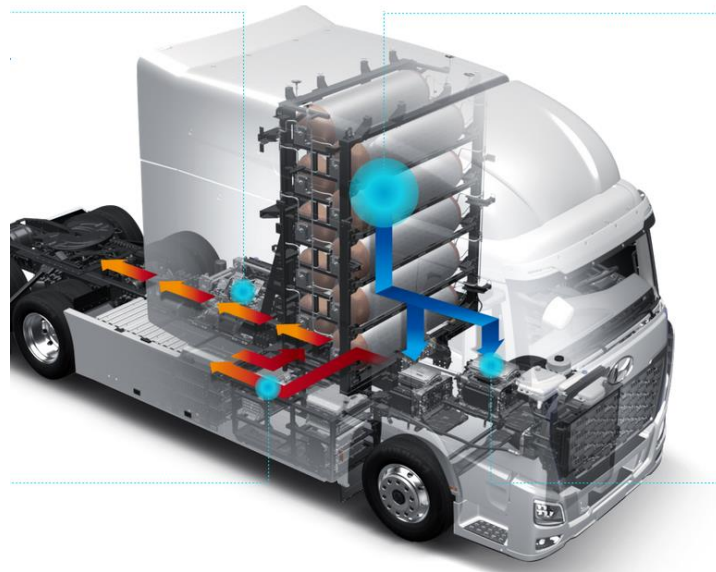


Ilustración 21. Distribución del sistema de propulsión Hyundai XCIENT Fuel Cell.

En la Ilustración 21 se puede apreciar que la distribución que utiliza el Hyundai XCIENT es diferente a la que utiliza el Quantron. En este caso, los tanques de combustible no se alojan en el piso, sino que se apilan en una estructura en la parte posterior de la cabina.

- **Mercedes GenH2.** Este prototipo que está probando Mercedes tiene la particularidad de estar alimentado por hidrógeno líquido. De esta forma, se consigue una densidad energética mucho mayor y la autonomía aumenta (1000 km por repostaje). Sus depósitos están en fase de desarrollo, ya que deberán de ser capaces de mantener el hidrógeno en estado líquido (criogenizado a -253°C) sin necesidad de ser refrigerados activamente durante un tiempo suficientemente largo.

Sin embargo, esto no está siendo tan fácil de resolver para la marca alemana. La pila de combustible tiene una potencia de 300 kW, la batería una capacidad de 70 kWh y los motores una potencia de 230 kW. La premisa principal de este camión es que cumpla los mismos requisitos que su hermano diésel, el Actros: capacidad para recorrer 1,2 millones de km en 10 años y capacidad de carga neta de 25 toneladas.



Ilustración 22. Mercedes Gen H2.



Ilustración 23. Recarga de hidrógeno líquido en el Mercedes Gen H2.

En la Ilustración 23 se puede ver una instantánea del repostaje de hidrógeno líquido.

3.5. Camiones dual-fuel

Actualmente, prácticamente **ninguna** de las principales **marcas** fabricantes de vehículos de transporte terrestre **comercializan** productos con motores del tipo **dual-fuel**. Los principales fabricantes ofrecen variantes que funcionan con GNC o GNL exclusivamente o con un pequeño aporte de gasóleo mediante inyecciones piloto. Son empresas especializadas en el sector las que ofrecen sus servicios de transformación de motores.

Es relativamente fácil encontrar empresas que adapten los motores a funcionar con mezclas de gas natural y diésel, aunque hay muy pocas que ofrezcan servicios de conversión a hidrógeno y diésel.

Una de estas empresas es **West Port Fuel Systems**. Esta empresa lleva décadas desarrollando el motor con sistema de combustible dual de hidrógeno y diésel. Este motor se basa en la tecnología HPDI (High Pressure Direct Injection), la cual afirman que es más efectiva, en términos de reducción de CO₂, que las pilas de combustible. El resultado es el motor con tecnología H2-HDPI. Desde la empresa indican que un valor razonable de mezcla de combustible es un 30% H2 y un 70% Diésel, aunque han llegado completar exitosamente pruebas con hasta un 90% de H2. Por tanto, cuando el hidrógeno sea un combustible más universal, este tipo de motores tienen margen de mejora en cuanto a emisiones se refiere.



Ilustración 24. Camión modificado por West Port Fuel Systems en una hidrogenera.

A efectos de cálculo, para este trabajo **se va a considerar** en los sistemas de combustible dual un consumo del **50% para cada tipo de combustible**. Es un valor razonable porque la tecnología actual permite funcionar con esta mezcla, y el uso de combustible no renovable se reduce a la mitad.

En cuanto al consumo para este tipo de vehículos, depende evidentemente del porcentaje de cada combustible utilizado. Para el caso de este proyecto, con un aporte del 50% de cada tipo de combustible, se va a considerar que el consumo de los motores duales es la suma de la mitad del consumo que tendría un motor de cada tipo por separado.

3.6. Camiones con MCIA alimentado con GNC / Biometano / GNL

Hoy en día muchos de los principales fabricantes de vehículos de transporte por carretera comercializan modelos con motorizaciones que utilizan el Gas Natural como combustible. Es una forma sencilla de reducir tanto las emisiones directas como los costes de funcionamiento sin sacrificar en exceso el rendimiento o el precio de adquisición. Normalmente, para vehículos destinados al transporte de **larga distancia** utilizan **combustible licuado** y para **transporte regional** utilizan **combustible comprimido**.

Actualmente sólo se comercializan en España dos vehículos destinados al transporte de larga distancia que se alimenten con gas natural:

- **Volvo FH GNL.** Este camión se comercializa actualmente, y es la misma base del Volvo FH tradicional, pero con algunas adaptaciones que le permiten utilizar como combustible Gas Natural o Biometano licuados. Este sistema de propulsión es especialmente interesante porque se emplea GN en un motor de ciclo Diesel. Tradicionalmente, el GN se ha empleado en motores de ciclo Otto por su similitud con la gasolina. Sin embargo, los motores de ciclo Otto presentan desventajas notables en vehículos pesados para el transporte de mercancías, por lo que Volvo ha desarrollado una tecnología para poder emplear el GN en los motores con ciclo **diésel**. Esta tecnología consiste en la utilización de un doble sistema de *Common Rail* totalmente independiente para cada combustible (manteniendo la presión del gas a 320bar y la del gasóleo a 300 bar). Estos 2 sistemas paralelos alimentan a un único inyector que es capaz de independizar el suministro de ambos combustibles para el llenado de los cilindros. El **diésel** se usa como **inyección piloto** solamente para **provocar la ignición**. De este modo, las prestaciones de este motor (G13) son muy similares a las de su homólogo diésel (D13). El motor tiene una cilindrada de 13 litros y desarrolla 460 CV. El vehículo dispone de un depósito en un lateral de GN con capacidad para 205 kg, y dos depósitos en el otro lateral: uno de diésel de 75L y otro de *AdBlue* de 64L. No se tienen datos respecto al precio.



Ilustración 25. Volvo FH GNL.

- **IVECO S-WAY GNL.** Este modelo también se comercializa desde hace algunos años en el mercado europeo. Se trata de un motor de **GN clásico**: es de ciclo **Otto**, con una cilindrada de 13L que desarrolla 460 CV. Tiene autonomía de hasta 1600 km con 410 kg de GN. Haciendo cálculos rápidos, eso se traduce en un consumo de 25,3 kg de GN a los 100 km.



Il·lustració 26. Iveco S-WAY GNL.

3.7. Camiones con MCIÀ alimentados con H₂

Actualmente, no se comercializa **ningún vehículo** con esta **tecnología**. Se tiene constancia de que muchas marcas están haciendo pruebas y desarrollando prototipos de motores de combustión interna alternativos que se alimentan con H₂, pero no se ha llegado a la comercialización de ningún vehículo.

Es el caso de Toyota: están probando esta tecnología en un Corolla adaptado y preparado para competición, el GR Corolla H₂. En la Ilustración 26 se puede ver una imagen de este prototipo compitiendo en una carrera de resistencia en Japón. Por el momento, el prototipo se muestra competitivo en cuanto a prestaciones, pero no en cuanto a autonomía. Tuvo que hacer más del doble de paradas para repostaje que el resto de sus rivales durante las 24h de la competición.



Il·lustració 27. Toyota GR Corolla H2 competint en les 24h de Fuji 2023.

El fet de que les proves d'aquest tipus de sistema de propulsió només s'estan fent en cotxes utilitaris o esportius té una raó: el H₂ és considerat per alguns com el futur substituït de la gasolina. Per tant, algunes marques s'estan centrant en desenvolupar motors esportius o de competició amb aquesta tecnologia.

Per al sector del transport, per el contrari, sembla que aquesta tecnologia no s'ha posicionat com una de les favorites per als fabricants. Això es deu, entre altres coses, a la **pequeñíssima infraestructura de recarga i de producció** de hidrògen (en Espanya comptem amb una sola hidrogenadora) en comparació amb altres tecnologies. Per tant, les dades d'entrada que es prendran per aquesta alternativa de propulsió són teòrics, proporcionats per el CMT.

3.8. Resum de dades rellevants d'entrada per als càlculs

La presentació dels diferents models per a cada sistema de propulsió té com objectiu trobar les dades d'entrada necessàries per poder realitzar la comparativa. Com s'ha pogut demostrar, cada valor que s'utilitzarà està correctament justificat, ja que té darrere un exhaustiu treball d'investigació. A continuació, es presenta una taula en la que es especifica els **dades d'entrada de consum** de combustible en tanque i **preu d'adquisició** del vehicle.

NOTA: Sent el mateix motor i un combustible molt semblant, podem prendre com referència el consum de dièsel per poder obtenir el consum de biodièsel. Sabent les densitats i els

poderes caloríficos de ambos combustibles se puede obtener el consumo que debería de tener un MCIA equipado con biodiésel, tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Consumo}_{\text{Biodiésel}} &= \text{Consumo}_{\text{Diésel}} * \frac{\rho_{\text{diesel}} * Hc_{\text{diesel}}}{\rho_{\text{biodiesel}} * Hc_{\text{biodiesel}}} = 35 * \frac{0,83 * 43,1}{0,89 * 37,2} \\ &= 37,9 \text{ L}/100\text{km} \end{aligned}$$

NOTA 2: En cuanto al consumo de GNC y GNL se considera que es el mismo. Los combustibles no tienen exactamente la misma composición, ya que el GNL contiene un poco más de metano que el GNC y el poder calorífico, por tanto, es un poco mayor. Sin embargo, a efectos de este trabajo se van a considerar iguales los poderes caloríficos, ya que simplifica los cálculos y el error que añade es despreciable. Se especifica un consumo de 30,1 kg a los 100 km. Aunque los modelos comerciales estaban un poco por debajo de este valor, se decide tomar este valor porque es más habitual entre la flota de GN que existe en circulación. Este consumo se ha obtenido multiplicando el consumo de diésel por la relación de poderes caloríficos y mayorando este valor un 10%

NOTA 3: El consumo de biometano se puede obtener de forma análoga al consumo de Biodiésel. En este caso, se toma como referencia el consumo de GNC por las similitudes entre ambos sistemas de propulsión. En este caso, como el consumo viene dado en kg/100 km no hay que incluir la relación de densidades en el cálculo, simplemente con la relación de poderes caloríficos ya se puede obtener:

$$\text{Consumo}_{\text{Biometano}} = \text{Consumo}_{\text{GNC}} * \frac{Hc_{\text{GNC}}}{Hc_{\text{biometano}}} = 27,3 * \frac{46,6}{46,1} = 27,6 \text{ kg}/100\text{km}$$

Como se puede apreciar, la diferencia en el consumo de ambos combustibles no es para nada significativa. Esto se debe a que los poderes caloríficos de ambos combustibles son muy similares, lo cual tiene mucho sentido. Ambos son gases combustibles cuyo componente principal es el metano.

Teniendo en cuenta esto, usar la relación de poderes caloríficos no difiere mucho de suponer el consumo de GNC igual al de biometano. Sin embargo, como es una operación muy sencilla, se va a obtener el consumo de Biometano a partir de la relación de poderes caloríficos.

NOTA 4: Como se ha especificado en el apartado 3.5, el consumo del dual fuel es la suma de la mitad de los consumos que tendrían cada combustible en solitario.

NOTA 5: El consumo de los sistemas de pila de combustible se fija en 7,8 kg de H₂ a los 100 km, datos proporcionados por Hyundai.

NOTA 5: El consumo de los vehículos electros se cifra en 120 kWh a los 100 km, ya que es un valor intermedio entre los consumos declarados por los modelos presentados.

Tabla 5. Resumen datos de entrada para realizar los cálculos necesarios para la comparativa.

Sistema de propulsión	Consumo de combustible (L/100km, kg/100km, kWh/100 km)	Precio de adquisición (miles de euros)
Diésel / e-Fuel	35	100
Biodiésel	37,9	100
GNC	30,1	120
GNL	30,1	125
Biometano	30,4	120
H2 MCIA	11	150
H2-GNC Mixed Fuel	5,5 kg H2 + 15 kg GNC	162
H2-Diésel Mixed Fuel	5,5kg H2 + 17,5 L Diésel	150
Pila de combustible H2	7,8	600
Eléctrico a batería	120	550

ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE ADQUISICIÓN

Dada la carencia de datos fiables sobre los costes de adquisición de los vehículos, especialmente los menos habituales, se han considerado los siguientes valores:

- 100k € una cabeza tractora diésel (y sus variantes de combustible líquido)
- 120k € una cabeza tractora de GNC (precios del mercado) y biometano.
- 125k € una cabeza con GNL (ligeramente superior al GNC).
- 150k € una cabeza con H2, se calcula suponiendo un incremento de 30k sobre una cabina de GNC debido a los requerimientos especiales (y que la tecnología es prácticamente experimental) para el almacenamiento del combustible
- Para una cabeza tractora con combustible dual se considera un incremento del 20% por el hecho de tener que coordinar ambos sistemas. Por tanto, el precio final es 1,2 por el precio ponderado de ambos sistemas
- 600k € para sistemas de pila de combustible. Es un valor elevado, pero son los precios que se manejan actualmente: la tecnología no está desarrollada, las ventas son residuales (lo que dificulta la fabricación en masa) y además los materiales son caros.
- 550k € para camiones eléctricos. Con la capacidad de batería requerida en esta aplicación, con autonomías más de 600km, los precios suben muchísimo.

4. Variables necesarias para la evaluación de las alternativas de propulsión para los camiones

En el presente capítulo se muestran las variables que se tienen en cuenta en la comparación de las distintas alternativas de propulsión. Estas variables influyen directamente en las prestaciones del camión y, por tanto, en la valoración final de las distintas alternativas. Las variables en cuestión son: potencia de propulsión, consumos de energía primaria, masas y volúmenes específicos, emisiones y costes.

4.1. Caracterización del recorrido de referencia

Tal y como se ha ido anticipando en puntos anteriores, no hay un sistema de propulsión idóneo y universal. La realidad es que dependiendo de las características del recorrido y de la carga a transportar unos sistemas de propulsión serán más adecuados que otros.

Si se quiere determinar cuál de las alternativas en la propulsión es la mejor, se debe hacer **en relación** con unas **condiciones concretas**. Pues en función de las características del recorrido puede ser más adecuado un sistema de propulsión u otro. Por tanto, los resultados obtenidos no serán universales: el mejor sistema de propulsión para una ruta de carretera de larga distancia no tiene por qué serlo para una ruta urbana de corta distancia.

Comentado esto, cabe decir que los datos de entrada de los que se dispone no son especialmente precisos, en el sentido de que dependen de muchas variables. Por tanto, no tiene sentido hablar de que la comparación que se va a realizar es sobre un trayecto determinado porque no se tienen unos datos de entrada tan específicos. Sin embargo, lo que sí es necesario especificar es un dato objetivo para la comparativa: la distancia diaria recorrida. Este valor tomará relevancia porque repercute directamente en las especificaciones del sistema de almacenamiento del combustible de las distintas alternativas.

Para poder obtener un dato de distancia diaria representativa se tienen en cuenta las siguientes consideraciones: tiempo máximo permitido en España de conducción para conductores de camión y velocidad media.

En cuanto al cálculo de la velocidad media, se puede hacer una aproximación muy fácilmente. La velocidad máxima permitida para camiones con semirremolque por autovías y autopistas es de 90 km/h, y en transporte de larga distancia la gran parte del tiempo se circula por este tipo de vías. Por tanto, se puede tomar como referencia una velocidad media de 70 km/h.

En cuanto al tiempo permitido de conducción en España, hay que considerar algunos matices, pues no hay un límite diario como tal. Las condiciones del sector son las siguientes:

- **Conducción diaria:** El tiempo máximo de conducción diario no puede exceder de 9 horas, salvo dos veces a la semana que puede llegar a las 10 horas.
- **Conducción semanal:** El tiempo de conducción semanal no superará las 56 horas (se entenderá por semana el período de tiempo comprendido entre las 00.00 del lunes y las 24.00 del domingo).

- **Conducción bisemanal:** El tiempo de conducción en dos semanas consecutivas no puede exceder de 90 horas. Así, si en una semana se conduce durante 56 horas (máximo permitido), en la siguiente sólo podrá conducirse durante 34 horas, puesto que ambas suman el máximo de 90 horas.

Como se puede apreciar, cada conductor hace un tiempo de conducción diario distinto en función del trabajo vaya a realizar próximamente o que haya realizado anteriormente.

Suponiendo que los camiones de la comparativa solo van a tener un conductor, y que van a trabajar de forma uniforme en el tiempo, es necesario cumplir con el límite de 90h cada 2 semanas. Si se toma una semana laboral como 6 días, solo se podrá conducir durante 7h i 30 minutos al día.

Con esto, ya se puede calcular la distancia diaria media recorrida:

$$Distancia\ diaria = v_{media} * t_{conduccion} = 70 \left(\frac{km}{h} \right) * 7,5 \left(\frac{h}{día} \right) = 525\ km/día$$

Por último, queda especificar los días de trabajo por año: se van a considerar **240 días** de trabajo anuales.

Con estos datos, ya se puede establecer un marco comparativo común, que constituye el primer paso de este trabajo.

4.2. Estimación de la energía necesaria para impulsar el camión

El proceso de transformación energética Tank-to-Wheel viene determinado por tres variables fundamentalmente:

1. Rendimiento del sistema de propulsión
2. Energía necesaria en rueda
3. Energía necesaria en tanque

Nota: las energías se expresan por unidad de longitud (km), tal y como se ha comentado anteriormente.

Estas tres variables se relacionan entre sí a través de la siguiente expresión:

$$\eta_{sp} = \frac{E_W}{E_T}$$

De modo que si se tienen dos de los tres parámetros se puede obtener el tercero. Más importante es considerar que estos valores deben ser coherentes y comparables a los que se dan en la práctica para los vehículos de transporte.

La energía necesaria en rueda se puede llegar a calcular de forma analítica, pero es un proceso complicado y el resultado final es fuertemente dependiente de muchísimos factores. El coste de cálculo es alto y el resultado puede ser muy distinto en función de la orografía, altitud, viento... Por tanto, se ha adoptado una estimación de ésta, tal y como se explica más adelante.

La energía necesaria en tanque es una variable que se puede obtener más fácilmente. El consumo de combustible de cabezas tractoras es un parámetro que también depende de múltiples factores, pero es un dato con valor medio recogido en la Tabla 5. Por tanto, los datos de consumo de combustible disponibles pueden considerarse fiables y generalizados para un tipo concreto de cabeza tractora y en unas condiciones representativas.

Operando este consumo con el poder calorífico y la densidad del combustible que quiera ser estudiado, se puede conseguir fácilmente el dato de energía necesaria en tanque por unidad de longitud:

$$E_T \left(\frac{kWh}{km} \right) = Consumo \left(\frac{kg}{km} \right) * Hc \left(\frac{kWh}{kg} \right)$$

Por último, se necesitaría tener el dato del rendimiento del sistema de propulsión. Sin embargo, ocurre como con la energía necesaria en rueda: es un dato muy difícil de obtener de forma exacta y los fabricantes no suelen compartir esta información. Por suerte, sí que se tienen nociones generalizadas sobre los rendimientos aproximados de cada sistema de propulsión. Es decir, se sabe que un sistema de propulsión formado por un MCI alimentado con Diésel no puede tener un rendimiento de un 45% (muy alto), del mismo modo que un sistema de propulsión 100% eléctrico no puede tener un rendimiento de un 60% (muy bajo).

El hecho de conocer los órdenes de magnitud de los rendimientos de cada sistema de propulsión permite tomar como dato de entrada la energía necesaria en rueda e ir realizando “pruebas” o iteraciones hasta que el rendimiento del sistema de propulsión sea del orden de magnitud correcto. Así, se le puede dar solución a la ecuación de 3 variables.

Por tanto, fijando el dato de entrada del consumo de combustible, se van introduciendo valores de energía necesaria en rueda hasta que el rendimiento obtenido para el sistema de propulsión tenga un orden de magnitud correcto.

Por ejemplo, se parte de un consumo de combustible de diésel de 35 L/100km:

$$E_T = 35,0 \left(\frac{L}{100km} \right) * 0,83 \left(\frac{kg}{L} \right) * 11,98 \left(\frac{kWh}{kg} \right) = 348,0 \left(\frac{kWh}{100km} \right) = 3480 Wh/km$$

Si ahora se supone una energía necesaria en rueda de 1500 kWh/100 km, se tiene:

$$\eta_{sp} = \frac{1500}{3480} = 0,431 = 43,1\%$$

Este rendimiento es demasiado elevado, por lo que la E_W se ha supuesto demasiado alta. El siguiente paso sería ir reduciendo la E_W hasta que el valor de rendimiento estén un orden magnitud correcto (alrededor del 25% para un vehículo diésel). Ahora se supone una energía necesaria en rueda de 900 kWh/100km:

$$\eta_{sp} = \frac{900}{3480} = 0,2586 = 25,9\%$$

Este rendimiento sí que es apropiado, por lo que se va a fijar una **energía necesaria en rueda de 900 kWh/100 km para un vehículo Diesel.**

Este procedimiento sólo se realiza para el combustible de referencia, que es el diésel. Para el resto de los combustibles, lo que se hace es coger el valor de energía en rueda necesaria y se multiplica por un factor que depende del incremento de masa debida al sistema de propulsión. A mayor masa, mayor energía en rueda. De este modo, el error introducido es mucho menor que si se realizara el mismo proceso de aproximación que se ha hecho para el diésel, porque el rendimiento de cada sistema de propulsión puede moverse en una horquilla de valores demasiado grande.

Este factor de incremento del consumo de energía en rueda depende del incremento de masa elevado a 0,55.

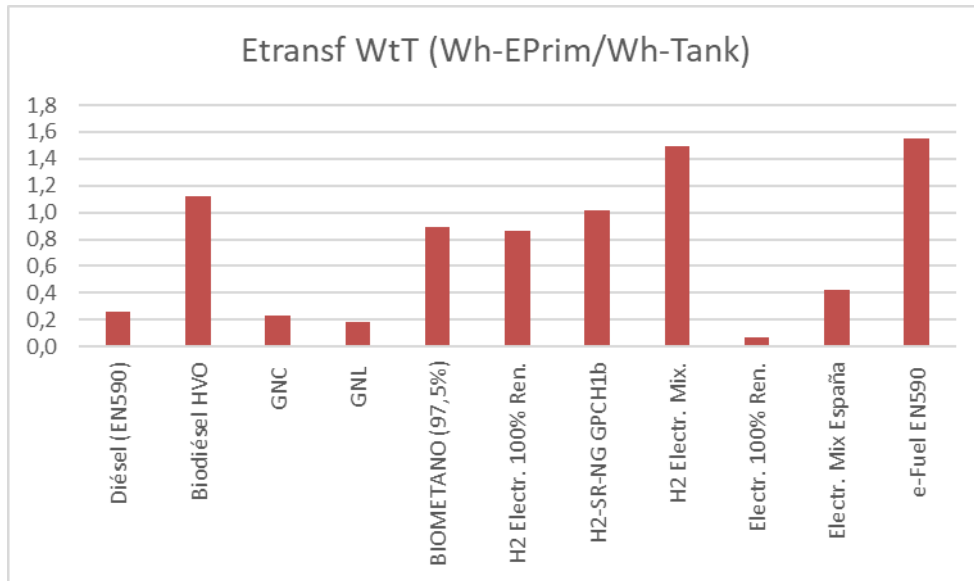
Por tanto, la suposición de tomar por válido un rendimiento cuyo orden de magnitud es correcto no introduce un error apreciable en el problema y permite poder realizar la comparativa sin que esta tenga un coste computacional excesivo.

4.3. Consumos de energía y emisiones de CO2 en la etapa W-T-T

El consorcio **JEC** es una **colaboración** de larga duración entre el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (**EC-JRC**), el Consejo Europeo de Investigación y Desarrollo del Automóvil (**EUCAR**) y el órgano científico de la Asociación Europea de Refinadores para el medio ambiente, la salud y la seguridad en el refinado y la distribución (**CONCAWE**). Esta institución tan reconocida elabora documentos acerca todos los aspectos relativos a la industria del automóvil, algunos de los cuales se van a utilizar en este trabajo como referencias para poder realizar correctamente este trabajo.

De acuerdo con la [JEC 2020], la energía de transformación “Well To Tank” (W-T-T) es la energía necesaria para poder llevar a cabo la producción de un combustible, incluyendo todos los procesos previos a la etapa de llenado del depósito o la recarga de la batería. Este dato de energías se suele expresar en unidades de energía empleada para producir una unidad de energía repostada en el depósito o en la batería.

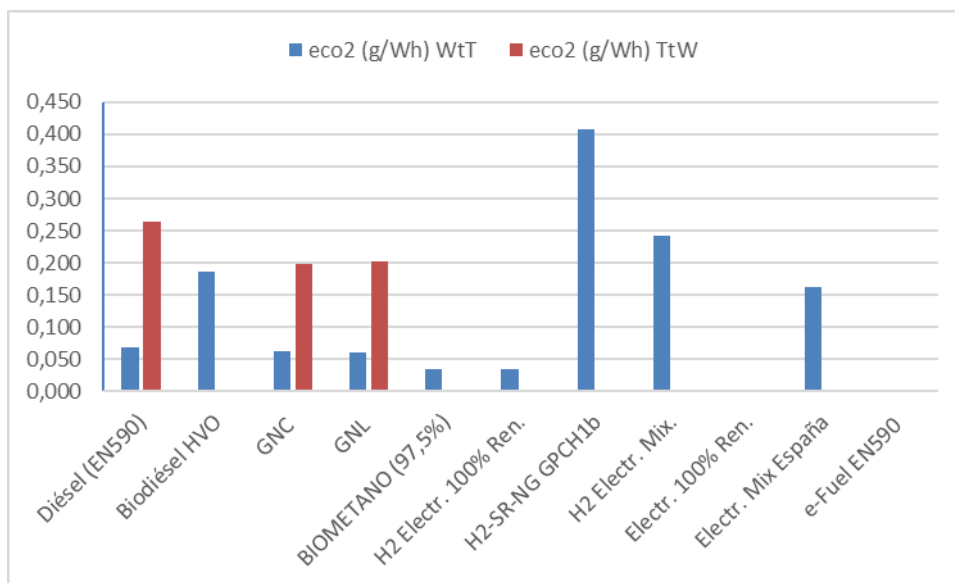
A continuación, en la Ilustración 28 se muestran los valores para los combustibles que componen la comparación. Nótese que en algunos casos se consideran diferentes formas de obtener un mismo combustible debido a que en función de la forma de obtención el consumo de energía cambia drásticamente.



Il·lustración 28. Energía de la transformación W-t-T de cada combustible.

Como se puede apreciar, las energías de transformación más altas corresponden al e-Fuel y al H2 producido con electricidad de la red eléctrica española.

Estos datos necesitan acompañarse de la emisión de CO2 en la producción de cada tipo de combustible, así la fotografía global del coste de fabricación de cada combustible es completa, ya que contempla el aspecto energético y medioambiental. En la Ilustración 29 se aprecian las emisiones de CO2 en la etapa W-T-T de cada combustible (en azul):



Il·lustración 29. Emisiones de CO2 W-t-T y T-t-W de los sistemas de propulsión.

Como se puede observar en la Ilustración 29, no considerar las emisiones producidas durante la producción de los diferentes combustibles supone introducir un error considerable. Hay combustibles que durante su utilización no generan emisiones directas, pero en el proceso Well-to-Tank generan una gran cantidad de CO2. Es el caso del hidrógeno obtenido por reformado del

gas natural o del obtenido mediante electrólisis utilizando energía de la REE (Red Eléctrica Española).

La electricidad de la REE se obtiene a través de la generación de energía eléctrica mediante diferentes sistemas de producción. Estos diferentes sistemas configuran el mix eléctrico español. El mix eléctrico es el **valor que expresa las emisiones de CO2 asociadas a la generación de la electricidad que se consume**, siendo un indicador de las fuentes energéticas que se usan para producir la electricidad. A continuación, en la siguiente ilustración se muestra un recorte de una factura de Iberdrola sobre el mix de la compañía y el mix nacional perteneciente al año 2022. En este caso, ambos son prácticamente iguales.

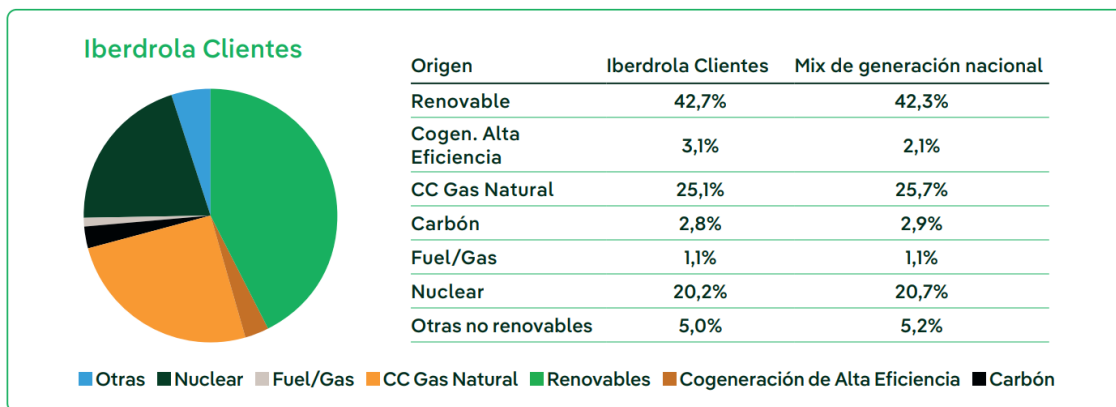


Ilustración 30. Mix eléctrico de Iberdrola Clientes (izquierda) y de generación nacional (derecha) en 2022.

Como se puede ver, un alto porcentaje de la energía producida es descarbonizada. Es razonable que los combustibles que utilizan energía eléctrica del mix eléctrico español no tengan unas emisiones de CO2 desorbitadas en sus transformaciones.

Características del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo. A pesar de ello, en la Tierra no se puede encontrar en su forma elemental (aislado), por lo que hay que aplicar diferentes métodos para poder disociarlo de moléculas en las que está contenido. En cuanto a la producción del hidrógeno, no hay una red común de hidrógeno, por lo que en función de su procedencia será más o menos limpio el proceso Well-to-Tank.

De entre todas las moléculas en las que el H₂ tiene presencia, las más abundantes son el **agua (H₂O) y los hidrocarburos**, especialmente el **metano (CH₄)**. Para poder disociar estas moléculas, se pueden seguir muchas vías distintas, aunque todas implican diferentes fuentes de energía primaria que pueden ser en forma de **luz, calor, energía eléctrica o combinaciones de estas fuentes**.

Los procesos de producción de hidrógeno se pueden caracterizar más fácilmente mediante la asignación de una etiqueta de color a cada proceso de producción. Aunque el hidrógeno es un gas incoloro, estas etiquetas son de uso común como notación abreviada. Son las que se describen a continuación:

- **Hidrógeno verde.** Es el obtenido mediante la electrólisis del agua cuando la electricidad utilizada en el proceso proviene de una fuente renovable.
- **Hidrógeno rosa.** Es el obtenido mediante la electrólisis del agua cuando la electricidad utilizada en el proceso procede de una fuente de generación basada en energía nuclear.
- **Hidrógeno azul.** Se obtiene mediante el reformado del metano con vapor, pero en este caso el CO₂ se captura y se almacena en un sistema CCUS, por ejemplo.
- **Hidrógeno amarillo.** Se obtiene mediante la electrólisis del agua cuando la electricidad utilizada en el proceso proviene del mix eléctrico español.
- **Hidrógeno gris.** Es el hidrógeno obtenido mediante el reformado del metano con vapor y el CO₂ producido se libera a la atmósfera.
- **Hidrógeno negro.** Es el hidrógeno que se obtiene a partir del carbón mediante la gasificación. Se libera una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera.

En la Ilustración 31 se clasifican estos métodos de producción de hidrógeno de menor a mayor emisión de CO₂ en su proceso de obtención:



Ilustración 31. Tipos de hidrógeno en función de su proceso de obtención.

En cuanto al **resto de combustibles** considerados, se consideran las **formas de producción** contempladas en el documento **JEC Technical Reports WELL-TO-TANK** del año 2020.

4.4. Potencias y energías específicas de los sistemas de propulsión

En la Tabla 6 se muestran los valores de potencia específica tanto por unidad de masa como por unidad de volumen, en ambos casos del sistema de propulsión (kg de masa y L de volumen exterior).

Los valores de potencia y peso de la unidad de potencia de cada sistema de propulsión no son datos que se consiguen fácilmente. Estos valores han sido proporcionados por el Instituto CMT. Cabe decir que son valores representativos, por lo que lo realmente interesa no es el dato exacto, sino el orden de magnitud que tienen.

Tabla 6. Valores de potencia específica de los distintos propulsores.

Valores de potencia específica	W/kg	W/L
Motor de combustión interna	300	150
Motor eléctrico	640	15000
Pila de combustible automoción	2000	3100
Pila de combustible Nuvera 60 kW	316	200
Pila de combustible Hyundai 95 kW	543	210

En cuanto al **motor de combustión interna**, se han tomado los datos de un motor diésel y se han considerado iguales para el resto de las motorizaciones de la comparativa (H₂, GNC, etc.). El error que se asume es aceptable porque los motores de combustión interna no difieren mucho en cuanto a peso y dimensiones independientemente del combustible que usen. Unos valores típicos de potencia de un motor de estas características son de alrededor de 450 CV (330 kW) y tienen pesos cercanos a una tonelada.

Para el **motor eléctrico**, se han tomado los datos del camión eléctrico TEVVA. No es un camión destinado a la larga distancia ni tiene una gran capacidad de carga, pero el CMT disponía de los valores de peso y volumen específico y se han utilizado porque es muy difícil obtenerlos de otros modelos. Las marcas están en pleno desarrollo de esta tecnología y los datos son muy difíciles de obtener. Aun así, no tiene por qué introducirse un error considerable, ya que la tecnología empleada será muy similar para camiones mayores, solo que escalada.

Respecto a las **pilas de combustible**, se tienen algunos datos, pero difieren entre sí. Como se sabe, hay muchísimos tipos de pilas de combustible que son muy diferentes entre ellos. Por un lado, la pila que utiliza el Toyota Mirai es una pila compacta para poder ser utilizada en una berlina, por lo que dispone de unos valores específicos muy elevados. Por otro lado, marcas como Hyundai y Nuvera que se centran en el desarrollo de la tecnología de pilas de combustible para vehículos industriales y de transporte de personas y mercancías tienen valores mucho más bajos. Esto tiene sentido: en vehículos en los que el espacio y el peso no son un (gran) problema, el desarrollo puede centrarse en otros aspectos como la economía y/o la durabilidad. Debido a la similitud con la aplicación que se trata en este trabajo y a que se conocen los datos gracias a fuentes internas, se van a tomar los datos de la Pila de combustible de Nuvera para transporte por carretera. Esta pila anuncia una potencia de 60 kW y un peso de 190 kg, de ahí los 315,8 W/kg.

Con todos los datos de la Tabla 6 se puede formar una idea aproximada del espacio y peso que ocupan los diferentes sistemas de propulsión de la comparativa. De todos los analizados, el que más energía genera por unidad de masa y de volumen es el motor eléctrico. Esto se debe a diversas razones, entre las cuales están el no tener que activar sistemas auxiliares que generen pérdidas de carga, su mayor rendimiento debido a la tecnología intrínseca al tipo de propulsor...

Por otro lado, el motor de combustión interna y la pila de combustible son los que menor potencia generan por unidad de masa y de volumen.

4.5. Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento

En esta sección se van a mostrar los diferentes de masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento. Entiéndase por masa y volumen específicos la masa y el volumen por unidad de energía almacenada. El sistema de almacenamiento se compone del combustible y del depósito de almacenamiento. En la Tabla 7 se especifican los datos utilizados para poder obtener los valores específicos (mostrados en las columnas en verde).

Tabla 7. Masas y volúmenes específicos de los diferentes sistemas de almacenamiento.

Sistema Almac. = Combustible + Contenedor Tipo de almacenamiento	Unidad característica	Densidad propia m_{comb}/V_{comb} (kg/L)	Densidad aparente m_{comb}/V_{sist} (kgcomb/Lsist)	Energía específica Combustible (kWh/kg)	Energía específica Sistema E/m_{sist} (kWh/kg _{sist})	Fracción masa fm $(m_{comb}/(m_{comb}+m_{contenedor}))$	Masa del sistema m_{sist}/E (kg _{sist} /kWh)	Fracción volumen fv $(V_{comb}/(V_{comb}+V_{contenedor}))$	Volumen del sistema V_{sist}/E (L _{sist} /kWh)
Gasóleo	L	0,832	0,749	11,980	11,02	92,0%	0,091	90%	0,111
Biodiésel	L	0,890	0,801	10,333	9,51	92,0%	0,105	90%	0,121
GNC 20 MPa	kg	190,795	0,167	12,944	4,53	35,0%	0,221	NA	0,464
GNL	kg	0,430	0,500	13,556	9,49	70,0%	0,105	NA	0,148
Biometano 20 MPa	kg	182,000	0,167	12,806	4,48	35,0%	0,223	NA	0,469
H2 35 MPa	kg	22,873	0,017	33,330	1,67	5,0%	0,600	NA	1,800
H2 70 MPa	kg	38,223	0,022	33,330	1,90	5,7%	0,526	NA	1,350
Batería electr. Vehículo	kWh	NA		0,141	0,14	NA	7,092	NA	6,447
e-Fuel diésel	L	0,780	0,702	12,222	11,24	92%	0,089	90%	0,117

NOTA: En los sistemas de propulsión duales, para calcular el volumen y la masa del sistema de almacenamiento se toman los valores del combustible más desfavorable. Por ejemplo, si se tiene un sistema de propulsión dual H2-GNC, para calcular la masa y el volumen del sistema de almacenamiento se hace de la siguiente forma:

1. Se suman las energías de los dos sistemas de almacenamientos.
2. Este valor de energía total se multiplica por los valores de Masa del sistema de almacenamiento/E y Volumen del sistema/E para el combustible cuyos valores sean más desfavorables.

Evidentemente, se está cometiendo un error porque no toda la energía almacenada se almacena en el mismo tipo de tanque. Sin embargo, al suponer que es así, se está del lado de la **seguridad**. El error de cálculo será máximo cuando en el sistema de propulsión dual se utilice un 100% de la energía cuyo volumen y masa del sistema de almacenamiento sea el más favorable. Por otra parte, el error será nulo en la situación contraria, cuando sólo se utiliza el combustible que es más desfavorable desde el punto de vista del almacenamiento. Para el caso de este trabajo, con un 50% de cada combustible, el error cometido se posiciona en un valor medio.

4.6. Emisiones de CO₂ en la fabricación del vehículo

En este capítulo se muestran las emisiones de dióxido de carbono generadas debido a la fabricación de las partes comunes los vehículos para todos los sistemas de propulsión considerados. Esto engloba todos los elementos que no forman parte del sistema de propulsión: chasis, carrocería, semirremolque, etc.

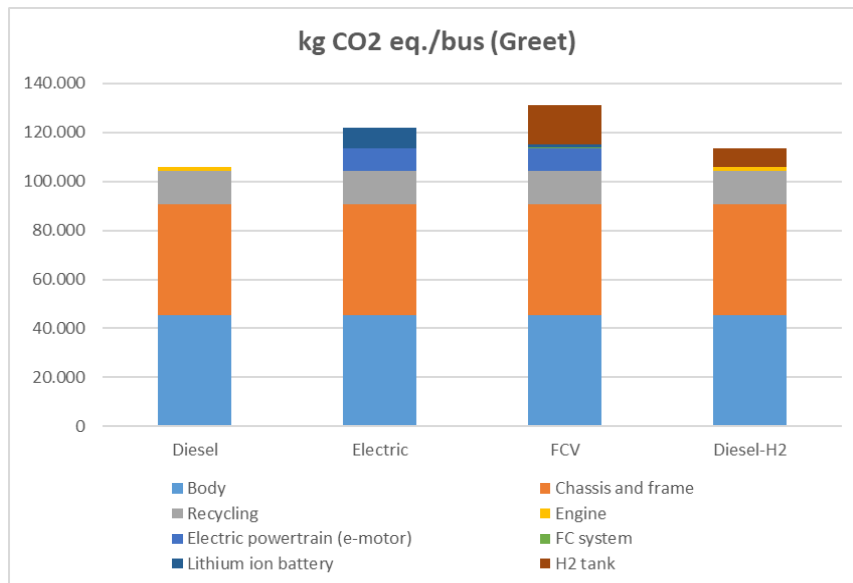
- **Obtener** los datos de emisiones debidas a la fabricación de los componentes es **difícil**, ya que debido a la dificultad de su obtención no son datos que se publiquen asiduamente y mucho menos en organismos oficiales. A pesar de ello, el **CMT ha proporcionado** para este trabajo unos **valores** de referencia de emisiones de dióxido de carbono en la fabricación tanto del vehículo como de algunos componentes de cada sistema de propulsión. Estos valores se extraen a partir del estudio *Model for Hydrogen Life Cycle GHG Emissions* [GREET, 2022]. En él, se determinan las emisiones en la fabricación de autobuses urbanos. El resultado de este estudio se muestra en la Ilustración 32, que muestra el desglose de emisiones de CO₂ que genera la fabricación de distintos sistemas de propulsión para un autobús urbano. En este caso, se asumirá equivalente a un vehículo de transporte de mercancías por carretera.

Asumiendo la suposición de que en la fabricación de un camión se emite el mismo CO₂ proporcionalmente que, en la fabricación de un autobús, la forma de calcular las emisiones durante la fabricación es sencilla: simplemente se trata de escalar. Es evidente que esta suposición no es completamente correcta, ya que la cabeza tractora de un camión generará más emisiones que el semirremolque y aquí no se contempla ese detalle, pero dada la escasez de datos, se acepta el error cometido. Por tanto, teniendo en cuenta que un peso apropiado para una cabeza tractora más un remolque es de alrededor de 16000 kg, las emisiones que se generarían durante el proceso de fabricación serían las que se especifican en la Tabla 8.

Tabla 8. Emisiones de CO₂ en la fabricación de los elementos comunes del vehículo.

Masas y emisiones vehículo sin SP	Autobús urbano		Camión	
Masa de vehículo Diesel de referencia	11.000	kg	16.000	kg
Emisiones CO ₂ fabricación por vehículo	93.500	kg/bus	136.000	kg/camión

Partiendo de este valor base, se puede obtener la cantidad de emisiones de CO₂ totales para cada alternativa si se conocen las emisiones que genera la fabricación de cada sistema de propulsión.



Il·lustració 32. Emisiones durante la fabricación de cada tipo de vehículo a partir de cálculos hechos con Greet.

Entrando en detalle, se pueden obtener los valores para cada uno de los componentes de cada sistema de propulsión de estos cálculos hechos con Greet.

Cabe decir que para el recuento de emisiones no se van a contabilizar las **emisiones** generadas por **algunos elementos** de los sistemas de propulsión por el simple hecho de que son **despreciables**. Por ejemplo, las emisiones generadas en un depósito de almacenamiento de gasóleo o de GNL son despreciables en relación con el resto de los componentes. Por otro lado, se ha hecho la simplificación de considerar que en la fabricación de un MCI se emiten los mismos kilogramos de CO2 independientemente del ciclo de funcionamiento y del combustible utilizado.

Con todo esto, en la Tabla 9 se presentan las emisiones específicas generadas en cada componente de cada sistema de propulsión:

Tabla 9. Emisiones específicas generadas durante la fabricación de los elementos de los sistemas de propulsión.

Emisiones CO2 Fabricación Componentes Sistema Propulsión	
Motor de combustión interna diésel	7,3 kgCO2/kW
Batería	150 kgCO2/kWh
Motor eléctrico	43 kgCO2/kW
Pila de combustible	8,0 kgCO2/kW
Almacenamiento H2 a presión	425 kgCO2/kg H2
Almacenamiento GNC	142 kgCO2/kg GNC

Con estos valores de emisiones expresados en kilogramos de CO2 por unidad de potencia, de energía o de masa de H2, si se establecen valores base se pueden comparar cualitativamente el nivel de emisiones para la aplicación del vehículo.

De este modo, se suponen los siguientes requerimientos:

- **Potencia del motor: 370 kW.** Es un valor en torno a los 500 CV, que es lo que tiene la mayor parte de los vehículos a la venta.
- **Capacidad de la batería: 630 kWh.** Se requiere este valor porque es la energía requerida para poder completar un día de trabajo sin recargar. El valor podría ser menor e incorporar en el itinerario diario alguna recarga, pero no se contempla esta posibilidad debido a que la idoneidad propulsión con batería quedaría condicionada a la red de puntos de recarga, y no es el objetivo del trabajo. Cabe decir sólo unos pocos modelos actuales llegan o superan este valor, como es el caso del Tesla Semi, aunque la tendencia es al alza y en los próximos años muchos modelos podrán conseguir estos valores de almacenamiento.
- **Potencia de la pila de combustible: 180 kW.** Las pilas de combustible en este tipo de vehículos suelen ser modulares y van sumando módulos básicos en función de los requerimientos. Camiones como el Hyundai Xcient Fuel Cell utilizan un sistema compuesto por dos pilas de combustible de 90 kW cada una, para alimentar a baterías de 72 kWh y a un motor de 350 kW. De ahí que se escoja este valor.
- **Almacenamiento de GNC: 160 kg.** Para el presente trabajo, se considera un consumo diario de GN de 158 kg, por lo que este es el valor escogido.
- **Almacenamiento de H2: 60 kg.** Del mismo modo que para el GNC, el consumo diario previsto es de 60 kg, por lo que se supone una capacidad de almacenamiento suficiente para cubrir la distancia diaria.

Con todo esto, ya se pueden calcular las emisiones totales generadas en la fabricación de cada vehículo en función del sistema de propulsión:

- Camión equipado con MCIa alimentado con diésel (y sus variantes):

$$\text{Emisiones totales} = 136000 + 7,3 * 370 = 138.701 \text{ kg de CO}_2$$

- Camión equipado con MCIa alimentado con GNC:

$$\text{Emisiones totales} = 136000 + 7,3 * 370 + 142 * 160 = 161.421 \text{ kg de CO}_2$$

- Camión equipado con MCIa alimentado con H2:

$$\text{Emisiones totales} = 136000 + 7,3 * 370 + 425 * 60 = 164.201 \text{ kg de CO}_2$$

- Camión equipado con pila de combustible:

$$\text{Emisiones totales} = 136000 + 43 * 370 + 8 * 180 = 153.350 \text{ kg de CO}_2$$

- Camión equipado con batería y motor eléctrico:

$$\text{Emisiones totales} = 136000 + 43 * 370 + 150 * 630 = 246.410 \text{ kg de CO}_2$$

Como se puede apreciar, la alternativa que más **emisiones de CO₂ genera en su fabricación** es el **sistema de propulsión 100% eléctrico**, siendo el término diferenciador el de las emisiones asociadas a la batería. En el caso opuesto se tiene al MCIa alimentado por diésel, que es el que menos emisiones genera en este proceso.

4.7. Costes específicos de los elementos de los sistemas de propulsión

En este capítulo, se van a detallar los costes específicos para cada sistema de propulsión.

En la siguiente tabla se muestran los **costes** de cada motorización **por kW generado** por el motor.

Tabla 10. Coste específico de adquisición de cada tipo de motorización.

Costes de adquisición	Sistemas para automoción
Motor combustión interna Diesel	50 €/kW
Motor eléctrico	25 €/kW

Por lo que respecta al resto de componentes a analizar, en la Tabla 11 se detallan los precios por unidad característica:

Tabla 11. Coste específico de adquisición de los elementos de los sistemas propulsivos.

Costes de adquisición	Sistemas para automoción
Pila de Combustible	1.200 €/kW
Almacenamiento hidrógeno a 35 Mpa	500 €/kg
Almacenamiento hidrógeno a 70 Mpa	600 €/kg
Baterías	300 €/kWh
Sistema control	100 €/kW

Como se puede apreciar, no se ha podido encontrar un precio específico para el almacenamiento de GNC. Debido a ellos, se ha utilizado un coeficiente de mayoración respecto al diésel, de un 20%.

Si se parte de un **precio base** para un camión **diésel** (cabeza tractora) de **100.000€**, mediante sencillas operaciones se puede obtener el sobre coste que supone cada una de las alternativas en cuanto a sistemas de propulsión:

- Camión equipado con MCIa alimentado con GN:

$$\text{Coste sistema} = 100.000 * 1,2 = 120.000 \text{ €}$$

- Camión equipado con MCIa alimentado con H2:

$$\text{Coste sistema} = 100.000 + 600 * 60 = 136.000 \text{ €}$$

- Camión equipado con pila de combustible:

$$\text{Coste sistema} = 100.000 + 1200 * 180 + 600 * 60 + 100 * 370 = 389.000 \text{ €}$$

- Camión equipado con batería y motor eléctrico

$$\text{Coste total} = 100.000 + 300 * 630 + 100 * 370 = 326.000 \text{ €}$$

Los valores obtenidos son orientativos y sirven para formar una **idea inicial**. En la realidad, debido a que las tecnologías están en fase de desarrollo y que no se han conseguido realizar producciones en serie, algunos costes son más elevados. Los costes usados para obtener los

costes de amortización de los diferentes camiones a lo largo de su vida útil **son los especificados en la Tabla 5**, en el punto 3.8.

Adicionalmente, se han considerado los **costes de mantenimiento** de cada alternativa de propulsión. Estos costes incluyen todas las sustituciones programadas de cualquier elemento de cualquier sistema de propulsión. En el caso de los MCIA incluye desde cambios filtros y aceite, hasta distribución, bujías, etc. Para los modelos **eléctricos**, se incluye en el coste de mantenimiento un **cambio de batería** a mitad de la vida útil del vehículo (6 años). Por esto, el coste del mantenimiento considerado de un camión 100% eléctrico es mucho mayor que el de un camión con MCIA, porque a pesar de que las operaciones de mantenimiento rutinarias sean más económicas, se incluye un cambio de batería. Estos valores son muy difíciles de obtener, pues surgen del tratamiento de muchísimos datos ofrecidos por una gran flota. En el caso de este trabajo, los **datos** del mantenimiento considerados han sido **proporcionados** por la **TMB** (empresa de Transportes Metropolitanos de Barcelona). Evidentemente, estos datos tienen su origen en el análisis de una flota de autobuses, pero dada la similitud de sistemas de los autobuses con los camiones se van a suponer los mismos costes de mantenimiento para ambos tipos de vehículos.

Cabe decir que estos datos sólo están disponibles algunas de las alternativas de propulsión analizadas en el proyecto, ya que la TMB no dispone de todos los sistemas propulsivos. Para los casos de los que no se dispongan datos, se van a suponer los costes de mantenimiento como iguales, o iguales minorados o mayorados a los costes de los vehículos de diésel o eléctricos de la TMB. Este coeficiente de mayoración se determinará en función de la similitud de los componentes de los sistemas de propulsión.

En la Tabla 12 se detallan los costes y las amortizaciones para poder realizar la comparativa económica de las alternativas.

Tabla 12. Resumen de costes y amortizaciones.

	Diésel	Biodiésel HVO	GNC	GNL	Biometa no	H2 en MCIA	H2 Renov.	GNC	H2-GNC Mixed Fuel	H2 Renov.	Diésel	H2-Diésel Dual Fuel	Pila Comb. Electr. Mix	Pila Comb. 100% Ren.	Pila Comb. SR NG	Eléctrico Mix España	Eléctrico 100% Ren.	e-Fuel Diésel
Datos de entrada		100% Renov.					H2 Renov. 50,0%	GNC 50,0%	H2+GNC Factor en	H2 Renov. 50,0%	Diésel 50,0%	H2+Diésel Factor energ.						
Resultados relevantes																		
Vida útil (años)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Recorrido anual (km/d) (k€, IVA excl) % de coste adquisición	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%			126.000 30%			126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%	126.000 30%
Coste amortización €/km	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07			0,07			0,07	0,28	0,28	0,28	0,25	0,25	0,05
Coste mantenimiento + reposición €/km	0,64	0,64	0,76	0,76	0,76	0,91			0,91			0,77	1,15	1,15	1,15	1,01	1,01	0,76
Coste total TCO €/km	1,18	1,22	1,18	1,25	1,30	2,08			1,72			1,63	2,21	2,21	2,21	1,41	1,50	1,86

5. Comparación de las alternativas de propulsión

Aquí se van a **comparar** finalmente los resultados obtenidos para cada una de **las 14 alternativas** de los sistemas de propulsión consideradas para el vehículo de transporte de mercancías terrestre de larga distancia. Para ello, se van a comparar los diferentes tipos de energía que consume cada alternativa, los rendimientos, las emisiones, las masas, los volúmenes y los costes de cada alternativa.

5.1. Energía consumida por unidad de longitud en cada alternativa

Energía necesaria en rueda para cada alternativa

La energía necesaria en rueda es distinta en función de la alternativa de propulsión escogida. En el apartado 2.2 se detalla cómo se ha obtenido este valor para cada sistema de propulsión. A continuación, en la Ilustración 33 se comparan las energías necesarias en rueda para cada alternativa.

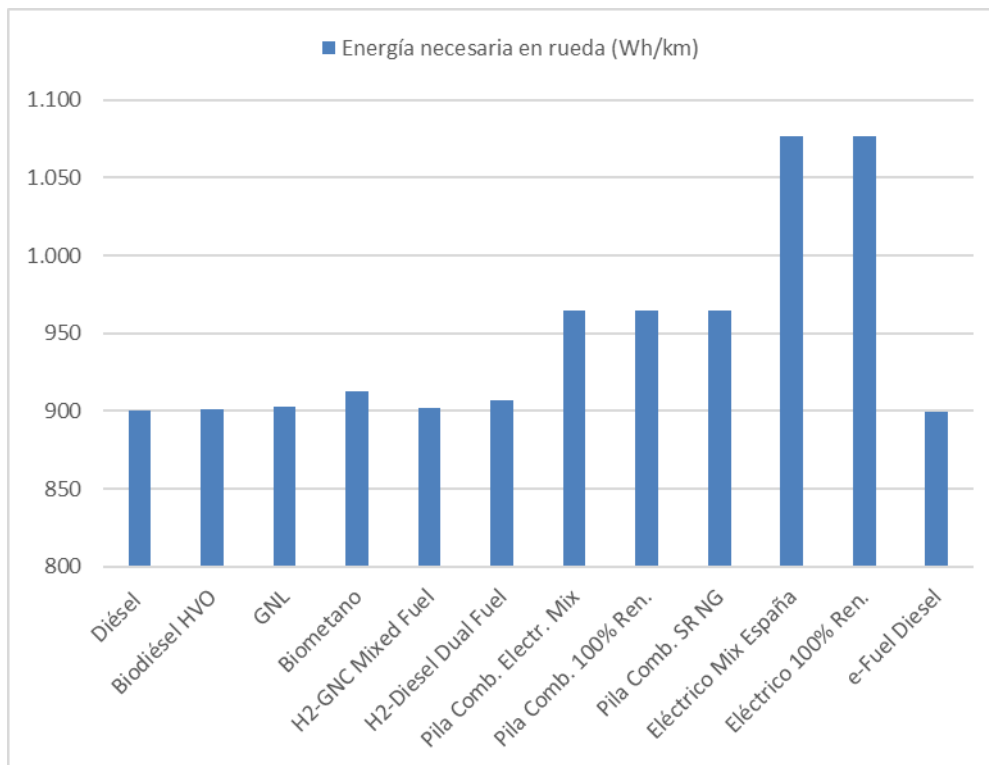


Ilustración 33. Energía necesaria en rueda (Wh/km) para cada sistema de propulsión.

Se considera una energía base en rueda de 900 Wh/km para el vehículo con el sistema de propulsión más ligero: un MCI alimentado con diésel. A partir de este valor, la energía en rueda se multiplica por la relación de pesos elevada a 0,55. De este modo, se puede apreciar que, para los vehículos más pesados, el valor de energía necesaria en rueda aumenta considerablemente. Es posible que este incremento de la energía en rueda debido al sobrepeso del sistema de almacenamiento sea muy elevado, pero no se dispone de una mejor estimación.

Rendimiento del tanque a la rueda (T-t-W)

A continuación, se muestra un gráfico en el que se comparan los rendimientos equivalentes de cada uno de los sistemas comparados del tanque a la rueda:

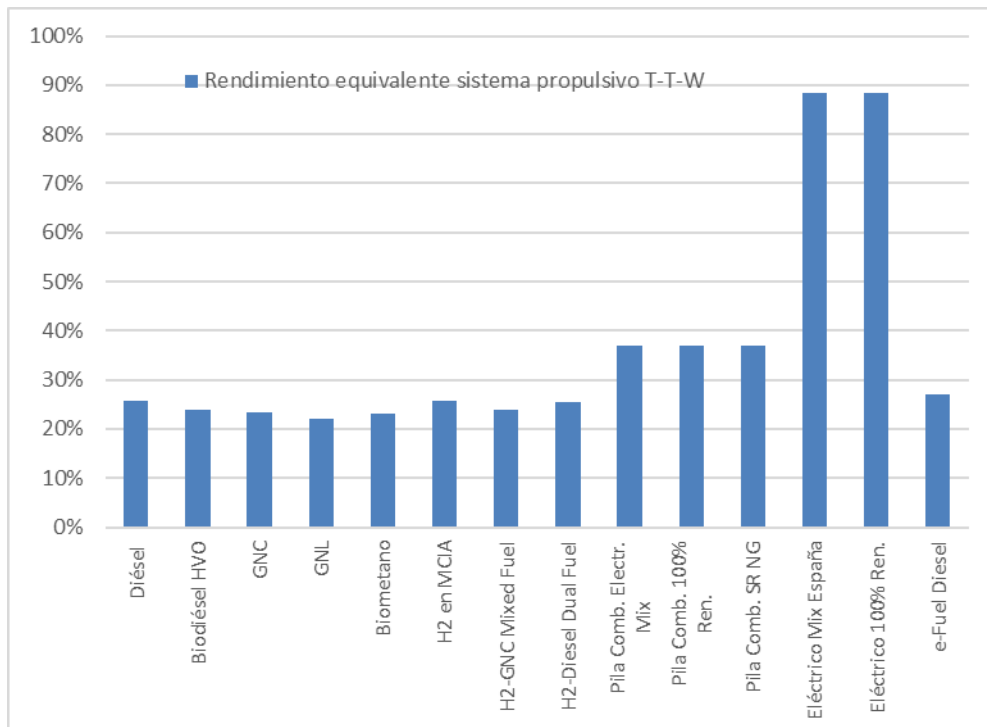


Ilustración 34. Comparación del rendimiento equivalente del sistema propulsivo T-t-W de cada sistema.

Como se puede apreciar, los **rendimientos más bajos** corresponden a las alternativas que emplean **motores térmicos** (es el caso del Diésel, Biodiésel, GNC, GNL, Biometano, H2 y e-Fuel). Esto se debe a que el rendimiento de los MCI que emplean estos vehículos está alrededor del 30%-35%, que junto con las pérdidas que se producen en la transmisión, ofrecen un **rendimiento T-t-W de alrededor del 26%**.

El segundo sistema propulsivo en cuanto a rendimientos T-t-W se refiere es el de **Pila de Combustible**. Un rendimiento correcto para la producción de energía eléctrica con una pila de combustible es de alrededor de un 50%. Teniendo en cuenta que los elementos de control de la energía y el proceso de carga/descarga de la batería pueden tener un rendimiento de un 85%, y el motor un rendimiento del 95%, obtener un **rendimiento T-t-W del 37%** es correcto.

Por último, el sistema que mayor rendimiento T-t-W ofrece es el **sistema de propulsión eléctrico** con batería. Este tipo de motores son capaces de ofrecer rendimientos muy altos (por encima del 90%), lo que sumado a los altos rendimientos de los controladores del sistema y de la descarga de la batería, da como resultado **rendimientos T-t-W mayores del 80%** en este proceso de transformación.

NOTA: tal y como se ha especificado en el apartado 3.5, los cálculos hechos para camiones que equipan un sistema de combustible dual se basan en el uso de un 50% de hidrógeno combinado con otro 50% de diésel o de gas natural.

Energía consumida en tanque

En este apartado se van a comparar las energías consumidas en **rueda** (azul) y en **tanque** (o en la batería, rojo) en cada uno de los sistemas propulsivos. La relación entre ambos valores es el rendimiento T-t-W, del cual se ha hablado en el apartado anterior.

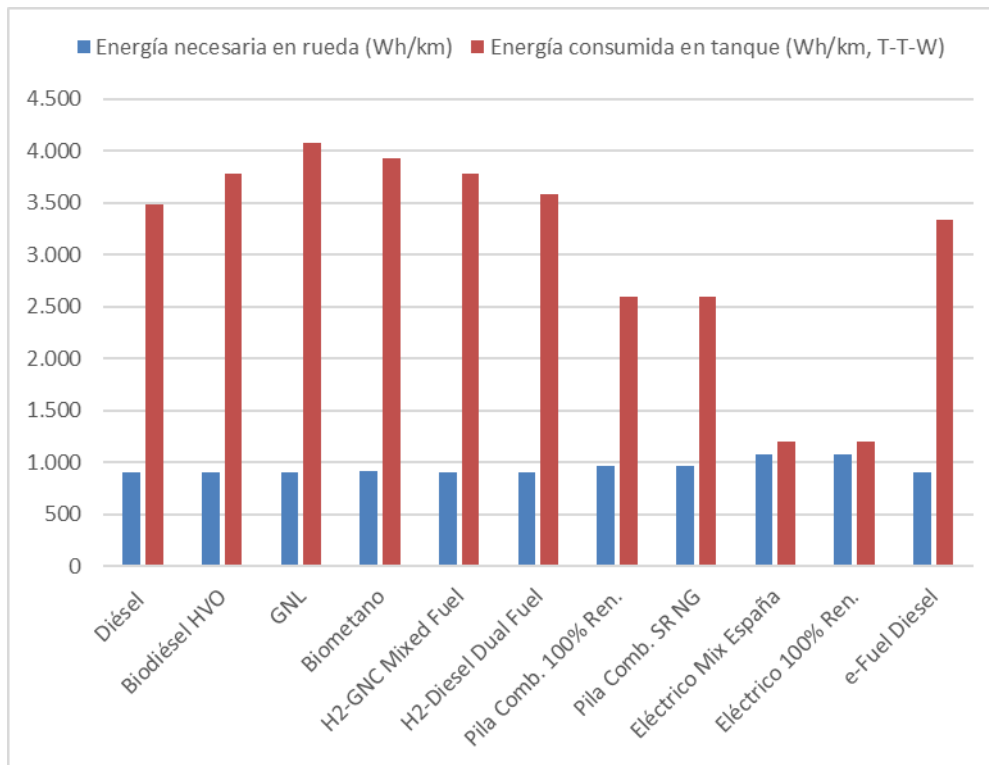


Ilustración 35. Energía consumida en tanque vs. Energía necesaria en rueda para cada alternativa.

Como es lógico, los sistemas que **más energía** en tanque necesitan son los que en el apartado anterior tenían un **rendimiento T-t-W menor**: los sistemas basados en motores térmicos.

Por otro lado, si se pone el foco en la energía necesaria en rueda, se puede observar que el sistema que más energía necesita en rueda es el eléctrico con batería. Esto se debe al aumento de peso respecto a las otras alternativas que supone la inclusión de la batería. Este elemento es tan pesado que es capaz de influir de forma no despreciable en el consumo en rueda necesario. Lo mismo, aunque en menor medida, le supone al sistema basado en pila de combustible, ya que incluye batería y pila de combustible. En este caso la diferencia es difícil de percibir mirando la gráfica, ya que la batería que incorporan estos sistemas es menor, pero existe un aumento de peso.

Energía necesaria para producir el combustible

Una vez determinados los parámetros energéticos que caracterizan a cada sistema de propulsión, se va a hacer lo mismo, pero con el combustible que utiliza cada una. De este modo, se puede analizar los consumos energéticos en todo el ciclo, incluyendo los correspondientes a la fabricación de los combustibles.

Cabe decir que los resultados que se van a mostrar en la siguiente gráfica son la combinación de los valores de energía necesarios para producir cada combustible (Wh-Eprim/Wh-tanque) que se presentaron en el apartado 4.2, y los valores de la energía necesaria en tanque para cada alternativa de propulsión (Wh-tanque/km).

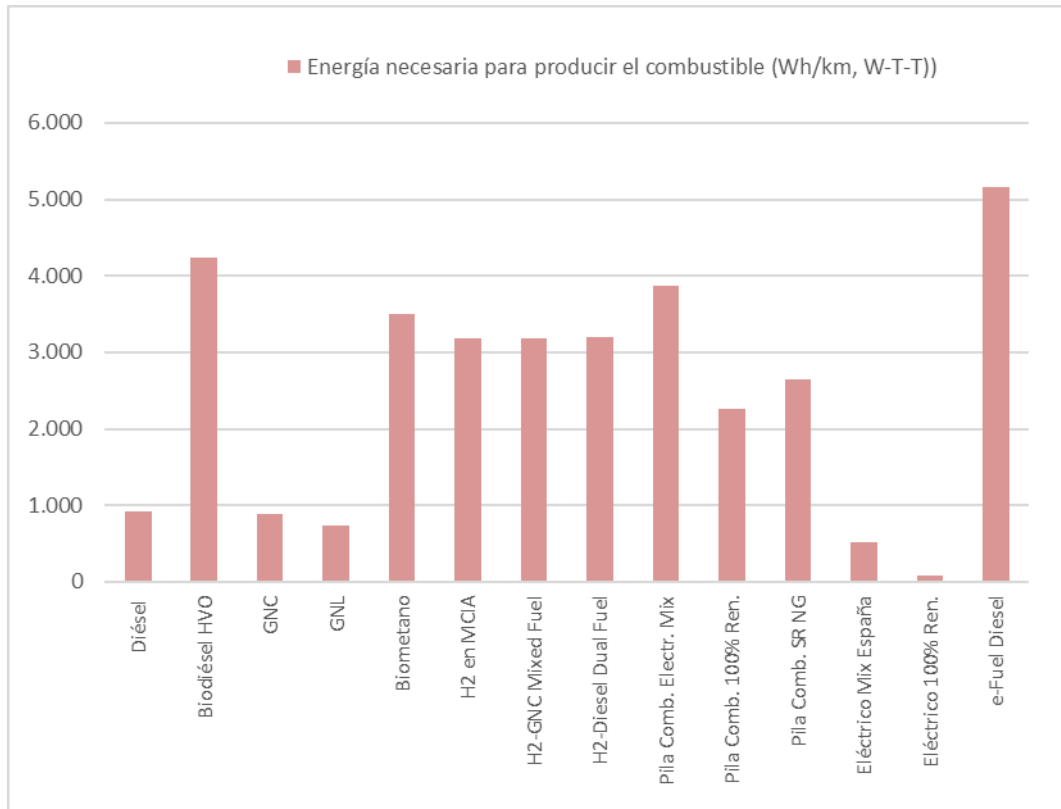


Ilustración 36. Energía necesaria para la producción de cada tipo de combustible. Etapa W-t-T.

Energía primaria consumida por unidad de longitud recorrida

A continuación, se presenta un gráfico en el que se muestra la **energía primaria**, obtenida como **suma** de **energía** necesaria para **fabricar** el combustible y **energía consumida** en **tanque**, para cada una de las alternativas.

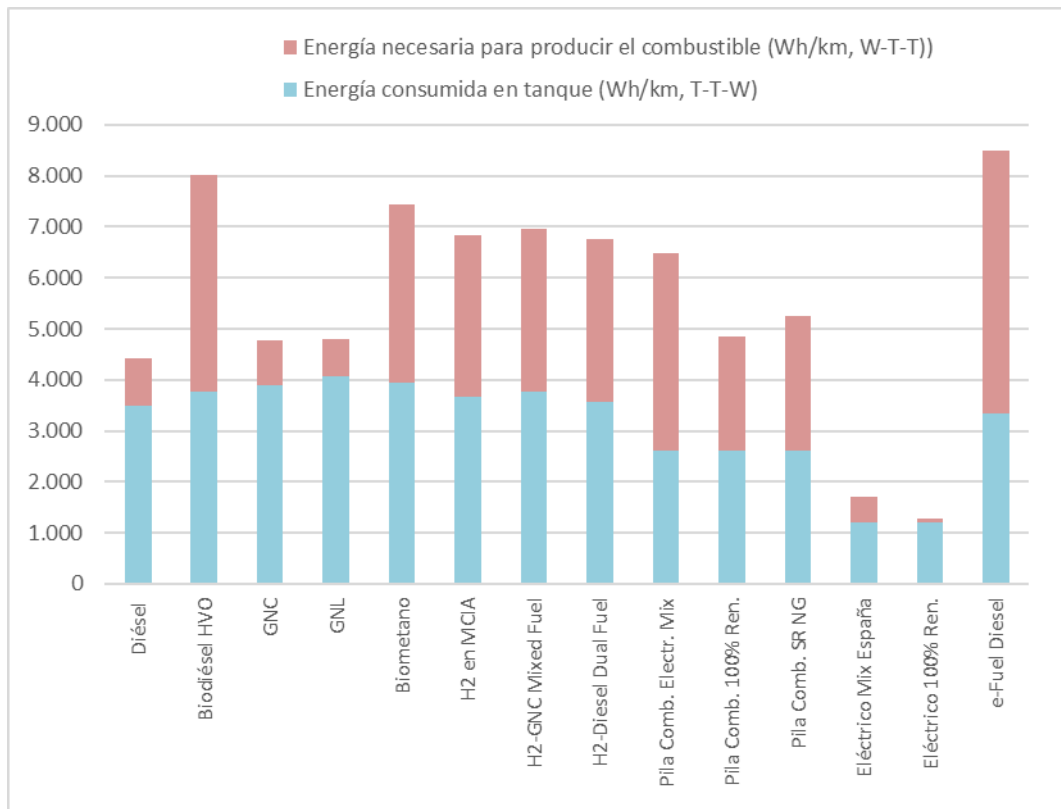


Ilustración 37. Energía primaria W-T-W consumida por kilómetro recorrido.

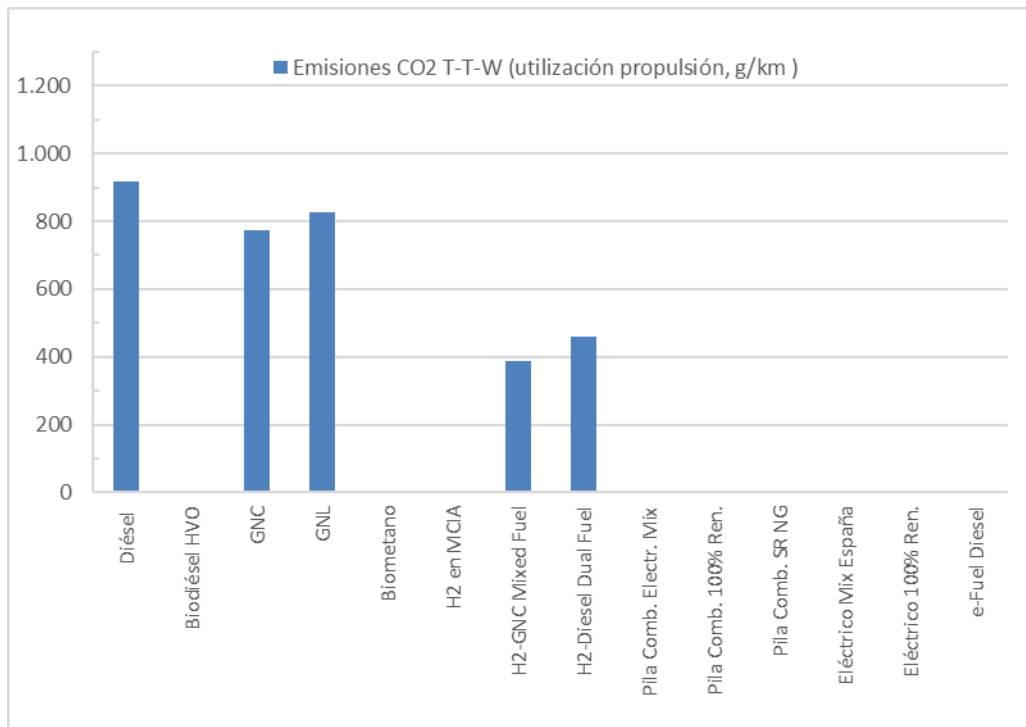
Ahora, con estos datos, ya se puede hacer una comparativa realista de la energía total que consume cada sistema de propulsión por unidad de longitud recorrida.

Tal y como se puede ver en la Ilustración 37, las alternativas que más consumo de energía tienen son los sistemas de propulsión que utilizan MCI alimentados con e-Fuel Diésel, Biodiésel y de forma dual con H2 y Diésel. Esto es debido a que estos **combustibles** necesitan de muchas transformaciones y están prácticamente **en fase de desarrollo**, por lo que los **procesos no están optimizados** y se requieren grandes cantidades de energía.

5.2. Emisiones de CO2 de cada alternativa

Emisiones directas de CO2 (T-t-W)

En este primer apartado, se muestra un gráfico en el que se pueden observar las emisiones directas (durante el funcionamiento) de cada sistema de propulsión.



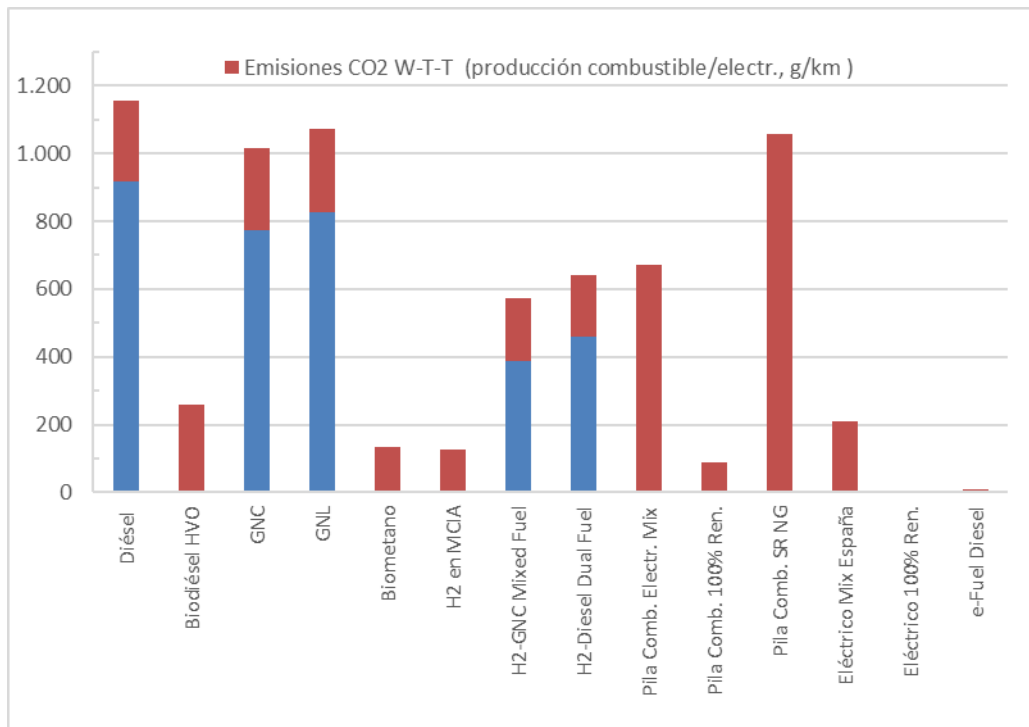
Ilustraci3n 38. Emisiones directas (T-t-W) de cada alternativa de sistema de propulsi3n.

Para los combustibles considerados como renovables, aunque generan emisiones de CO₂, éstas no se contabilizan, se consideran neutros en carbono. Adem3s, las alternativas que usan propulsi3n eléctrica no producen emisiones durante su funcionamiento.

Por tanto, estos datos aislados, son muy poco representativas. Se necesitan saber las emisiones de cada una de las alternativas a lo largo de todo el proceso para poder realizar una comparativa que sea realmente representativa.

Emisiones totales de CO₂ de cada alternativa (Well-to-Wheel)

Para poder ofrecer una imagen m3s completa del nivel de emisiones de cada uno de los sistemas de propulsi3n, en la siguiente gr3fica se incluyen a las emisiones durante el funcionamiento, las emisiones durante la producci3n de cada combustible.



Il·lustración 39. Emisiones W-t-W de cada alternativa.

Observando esta gráfica se puede comprobar que tener en cuenta solamente las emisiones durante el funcionamiento es un error. El sistema de propulsión basado en un MCIA alimentado con diésel sigue siendo una alternativa que emite mucho CO_2 . Sin embargo, hay una que la supera: la pila de combustible alimentada con hidrógeno obtenido a partir del reformado del gas natural. Además, el nivel de emisiones del resto de alternativas ha aumentado significativamente, por lo que se confirma que, para realizar una comparación correcta, es **necesario** tener en cuenta la **etapa Well-to-Tank**.

Emisiones totales de CO_2 incluyendo la construcción del vehículo para cada alternativa

Por último, en este apartado se van a incluir en el recuento de emisiones de CO_2 las emisiones generadas durante la fabricación de los componentes específicos de cada una de las alternativas. De este modo, se tienen en cuenta todos los datos y la comparación es más correcta. En el gráfico que se presenta a continuación, se pueden observar las emisiones generadas durante la fabricación de cada sistema propulsivo.

Hay que tener en cuenta que para realizar el cálculo de emisiones por unidad de longitud se han supuesto algunos datos. Se ha supuesto una **vida útil** del vehículo de **12 años**, con un kilometraje anual de **126.000 km** (525 km al día por 240 días de trabajo anuales). Así, las emisiones durante la fabricación de los componentes se han dividido entre los kilómetros recorridos durante la vida útil del vehículo y se han podido obtener los valores de emisiones durante la fabricación por cada kilómetro recorrido durante la vida útil.

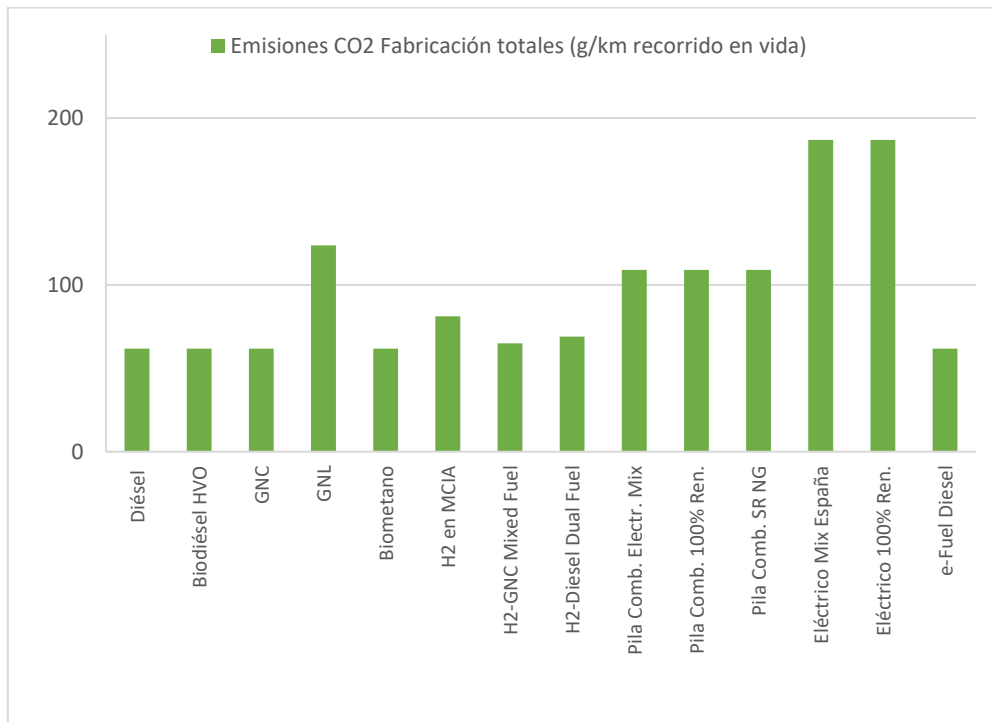


Ilustración 40. Repercusión de las emisiones de la fabricación de cada tipo de sistema propulsivo a lo largo del recorrido durante la vida del vehículo.

Como se puede observar, el orden de magnitud de estas emisiones no es muy grande en comparación a las emisiones W-t-W presentado anteriormente. Esto se debe a que un vehículo de transporte de mercancías terrestre recorre muchos kilómetros durante su vida útil. Aun así, es importante no despreciarlas porque a nivel de emisiones absolutas son valores altos.

Para finalizar la comparativa de emisiones de CO₂, a continuación, se presenta la Ilustración 41. En ella, se recuentan todas las emisiones por unidad de longitud para comparar todas las alternativas rápidamente a nivel gráfico.

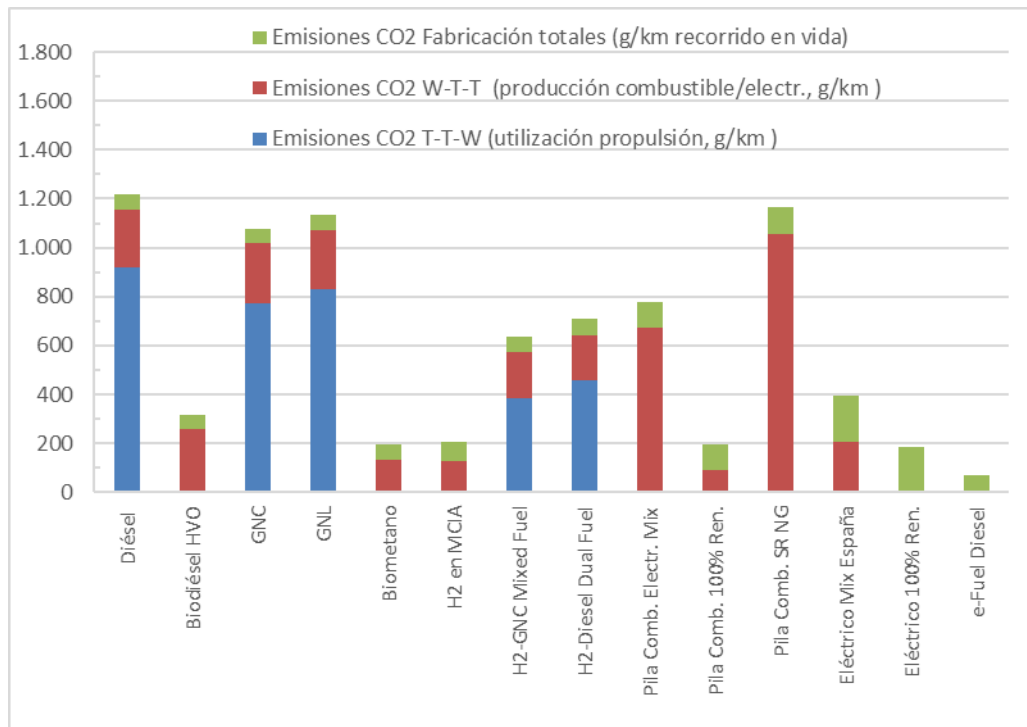


Ilustración 41. Emisiones totales de cada tipo de vehículo expresadas en gramos por kilómetro recorrido durante la vida útil del vehículo.

Tal y como se puede observar, la alternativa que **más emite** genera por unidad de distancia recorrida es la **pila de combustible** que utiliza como combustible hidrógeno obtenido a partir del reformado del gas natural, seguida por el MCI alimentado mediante gasóleo.

En el lado contrario, la alternativa que **menos emite** es la que emplea un **MCI** alimentado con **e-Fuel**, junto con los que se alimentan con otros combustibles renovables como el biometano o el H2 (si es verde) y el eléctrico 100% renovable.

5.3. Masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión y almacenamiento

En este apartado se especifican las masas y los volúmenes de cada una de las alternativas de los sistemas de propulsión, considerando también el almacenamiento. De hecho, para los almacenamientos lo que se ha hecho es considerar independientemente los depósitos de combustible líquido, los de combustible gaseoso y las baterías. Esto se puede apreciar en la Tabla 13. Cabe recordar que los **valores** mostrados son **específicos de esta comparativa**, ya que surgen de la necesidad de cubrir la distancia diaria recorrida por el vehículo que se estipula en el apartado 4.1. **Para otros casos**, los **valores** podrían ser muy **diferentes**.

Tabla 13. Masas y volúmenes de los diferentes sistemas de almacenamiento.

	Diésel	Biodiésel I HVO	GNC	GNL	Biometa no	H2 en MCIA			H2-GNC Mixed Fuel			H2- Diesel Dual Fuel	Pila Comb. Electr. Mix	Pila Comb. 100% Ren.	Pila Comb. SR NG	Eléctrico Mix España	Eléctrico 100% Ren.	e-Fuel Diesel
Datos de entrada		100% Renov.					H2 Renov.	GNC	H2+GNC	H2 Renov.	Diesel	H2+Diesel						
Resultados relevantes							50,0%	50,0%	Factor en	50,0%	50,0%	Factor energ.						
Masa sistema almacenamiento combustible (cont.+comb.) (kg)	166	192,5	451	226	456	1.155	289	113	595	289	42	330	819	819	819			155,8
Volumen sistema almacenamiento combustible (L)	204,2	221,1	947,2	315,7	957,4	3.465	866	236,8	1.786	866	51	917	2.457	2.457	2.457			204,2
Almacenamiento baterías/supercond (kWh)													118	118	118	630	630	
Masa sistema almacenamiento eléctrico (kg)													836,9	836,9	836,9	4.468	4.468	
Volumen sistema almacenamiento eléctrico (L)													760,8	760,8	760,8	4.062	4.062	
Masa total almacenamiento (kg)	166	193	451	226	456	1.155	289	113	402	289	42	330	1.656	1.656	1.656	4.468	4.468	156
Incremento Masa Vehículo Almacenamiento (ref. Diesel)	1,00	1,00	1,03	1,01	1,03	1,09	1,01	1,00	1,02			1,01	1,13	1,13	1,13	1,39	1,39	1,00
Volumen total almacenamiento (L)	204	221	947	316	957	3.465			1.786	866	51	917	3.218	3.218	3.218	4.062	4.062	204

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, los **resultados son muy diversos**. En cuanto a la masa de cada sistema de almacenamiento, los mejores valores se corresponden con aquellas alternativas que usan combustibles líquidos almacenados en depósitos a presión atmosférica. Los combustibles gaseosos tienen una masa mayor, debido a que los tanques, al ser presurizados, pesan más. En el caso del hidrógeno se nota aún más este fenómeno debido a que los tanques han de ser aún más pesados que para almacenar gases como el GN. A medida que se incorpora batería al sistema, la masa aumenta de forma abrupta: los sistemas con pilas de combustible tienen masas de almacenamiento grandes, y los eléctricos a batería tienen el peor dato de masa del sistema de almacenamiento.

Los datos de volumen de almacenamiento se corresponden prácticamente con los de la masa, excepto en el caso de los sistemas compuestos por pilas de combustibles. En este caso, el sistema necesita de muchos componentes (tanto baterías como tanques de H2) por lo que los valores de volumen de almacenamiento son del mismo orden de magnitud que para un eléctrico a batería.

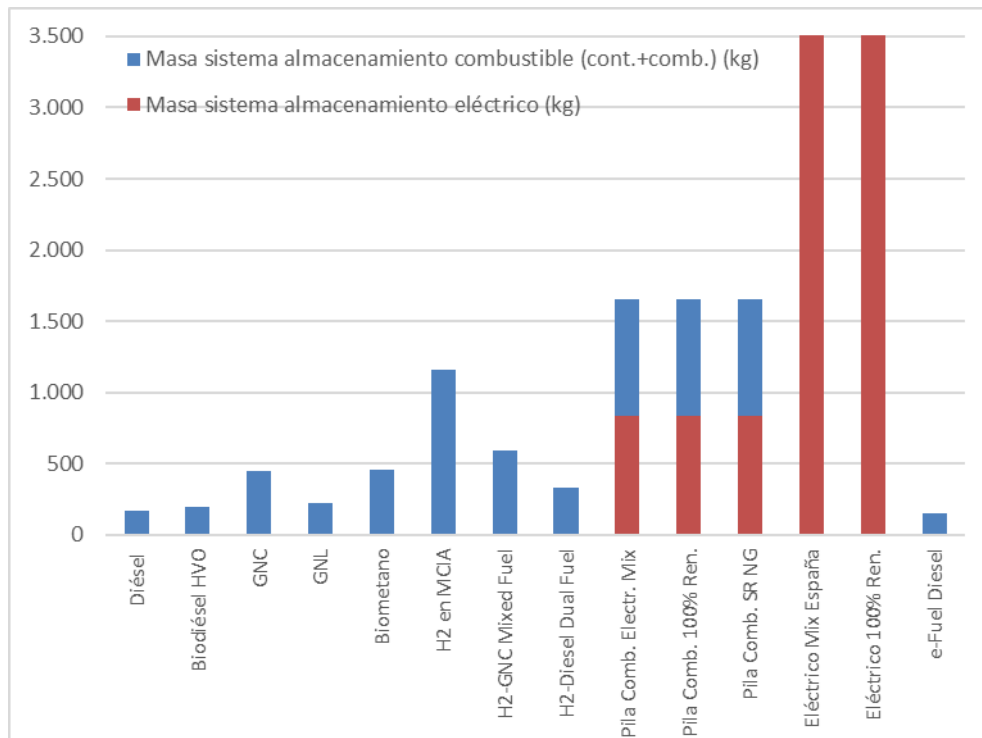


Ilustración 42. Masa de los diferentes sistemas de almacenamiento.

Con esta gráfica se puede apreciar la diferencia en las masas entre los distintos sistemas de almacenamiento. Tal y como se ha comentado anteriormente, en cuanto a combustibles, el **almacenamiento de H2** a presión es **complicado** y necesita de tanques especialmente pesados. De forma similar ocurre con las alternativas que emplean baterías para el almacenamiento de la energía eléctrica: las **baterías son** elementos **muy pesados**. La tecnología actual no permite fabricar baterías que no incluyan grandes cantidades de metales pesados, por lo que el peso final del componente es elevado también. Este hecho se ha de tener en cuenta, ya que los vehículos de transporte terrestre de mercancías tienen una masa máxima autorizada establecida por ley, tal y como se explica en el capítulo 3.1. Esto significa, que ese peso extra en el sistema de almacenamiento debe de compensarse quitándolo de otros sitios, como puede ser la capacidad de carga.

Por lo que respecta a los volúmenes, en la siguiente gráfica se muestran los volúmenes de los diferentes sistemas de almacenamiento eléctricos y de combustible.

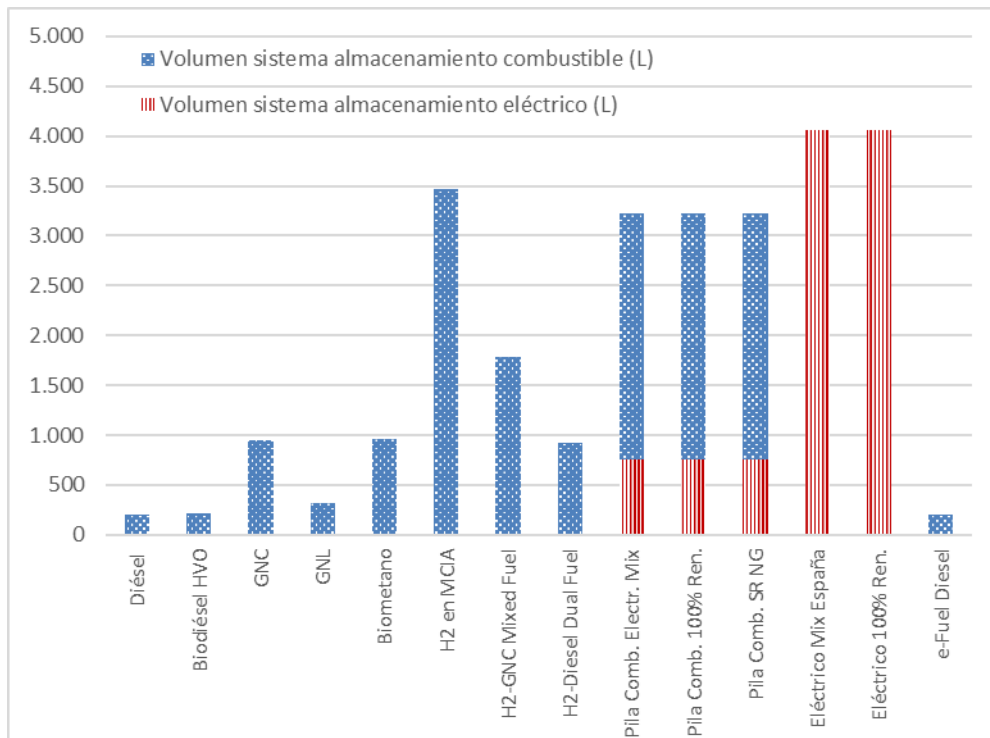


Ilustración 43. Volumen de los distintos sistemas de almacenamiento.

Tal y como se puede ver, las **alternativas** que incluyen **H2 o baterías** ocupan un **volumen elevadísimo**. Esto, que puede parecer un dato inofensivo, hay que tenerlo en cuenta: en los vehículos el espacio no sobra, y para poder introducir estos sistemas el espacio se tiene que ganar a costa de la habitabilidad o del espacio de carga, porque los vehículos tienen unas dimensiones máximas permitidas.

5.4. Costes de las distintas alternativas

En este apartado se muestran los costes totales de cada alternativa. Para poder analizarlos correctamente, se van a desglosar en:

- Coste del combustible o electricidad por unidad de distancia recorrida (€/km).
- Costes de mantenimiento por unidad de distancia recorrida (€/km).
- Costes de amortización por unidad de distancia recorrida (€/km).

Antes de empezar a mostrar los costes anteriores, en la Ilustración 44 que se presenta a continuación se muestran los **precios por unidad de combustible** con los que se han calculado los costes que se presentarán.

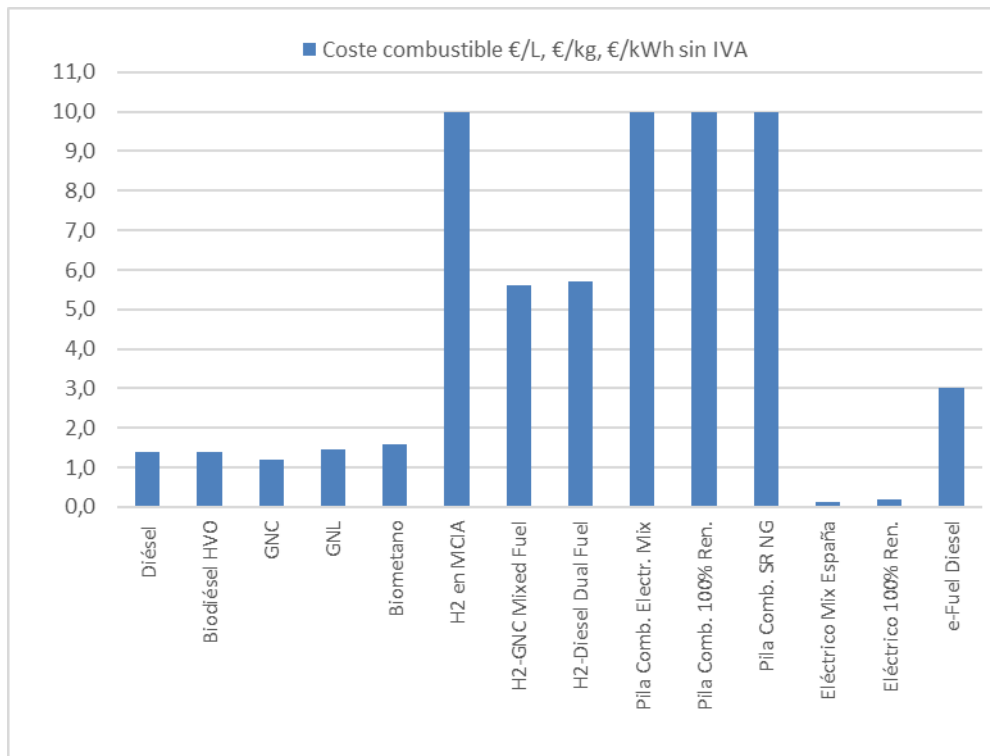


Ilustración 44. Precio de los combustibles a principios de 2024.

A continuación, se puede ver la primera gráfica de costes, que representa el **coste por kilómetro recorrido**:

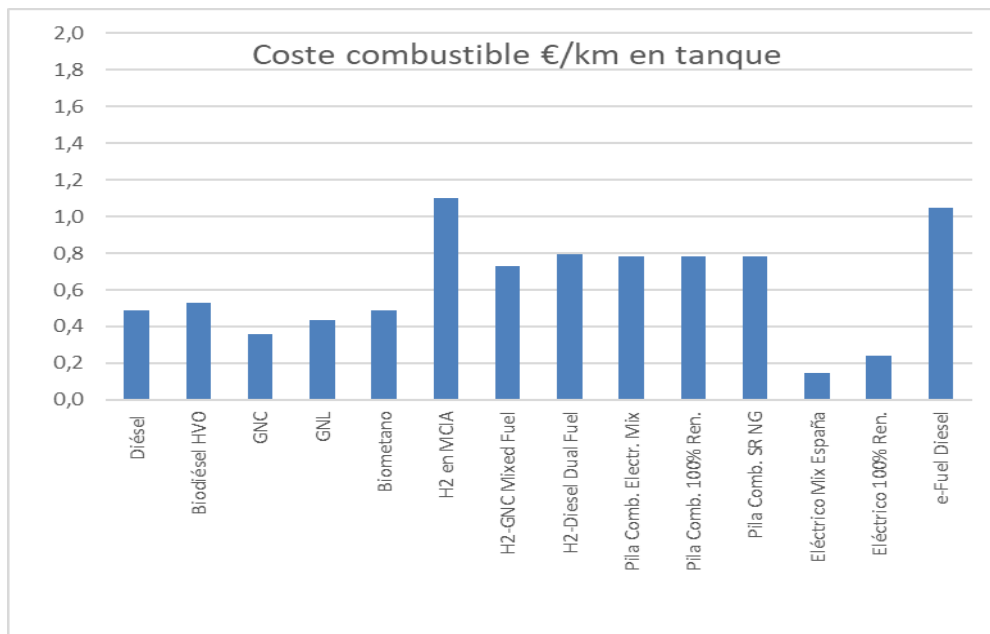


Ilustración 45. Coste del combustible expresado en euros por kilómetro recorrido durante la vida útil del vehículo.

Los combustibles más caros en su utilización son el H2 y el e-Fuel alimentando ambos a un MCI.A. Esto es debido a que ambos combustibles son difíciles de obtener y se requieren grandes cantidades de energía para que puedan ser producidos. Ciertamente es que son tecnologías “nuevas”, que se están desarrollando actualmente y en las que se espera una drástica reducción del precio durante los próximos años, al ritmo en que la tecnología mejora.

En la Ilustración 46, **se incluyen los costes de mantenimiento** de cada sistema de propulsión. Tal y como se ha explicado en el apartado 4.7, los costes de mantenimiento **incluyen todas las operaciones** a realizar en cada sistema de propulsión **durante su vida útil, incluyendo un cambio de batería** a los 6 años en el caso de los vehículos eléctricos.

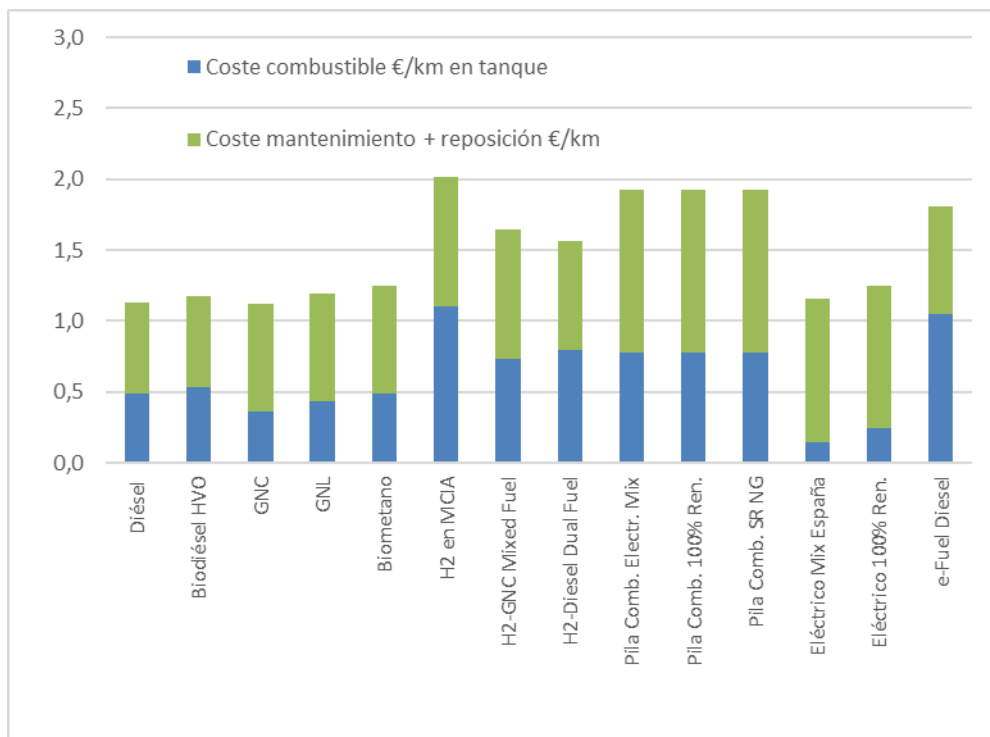


Ilustración 46. Costes de mantenimiento y combustible por kilómetro recorrido.

Los sistemas de propulsión con un mantenimiento más económico son los tradicionales: emplean tanques a presión ambiente y MCI.A. A medida que la tecnología se complica y menos desarrollada está, los costes suben. Aunque en el gráfico todos los costes parezcan similares, hay que tener en cuenta que son costes por kilómetro recorrido. Esto quiere decir, que si el vehículo recorre anualmente 126000 km y el coste de mantenimiento varía 50 céntimos (diferencia entre mantenimiento de diésel y pila de combustible), esto supone anualmente un incremento de 63000 euros.

Finalmente, se muestra el **coste total para la propiedad** en la Ilustración 47, que se compone sumando a los costes de combustible y mantenimiento, el coste de amortización. Siempre expresados en euros por kilómetro recorrido.

El coste de amortización por kilómetro se ha calculado de la siguiente forma:

$$\text{Coste amortización} = \frac{\text{Valor}_{\text{inicial}} - \text{Valor}_{\text{residual}}}{\text{km recorridos en la vida útil}}$$

Con,

$$Valor_{residual} = 0,7 * Valor_{inicial}$$

$$km \text{ recorridos en la vida útil} = 525 \left(\frac{km}{día} \right) * 240 \left(\frac{días}{año} \right) * 12 \text{ (años)}$$

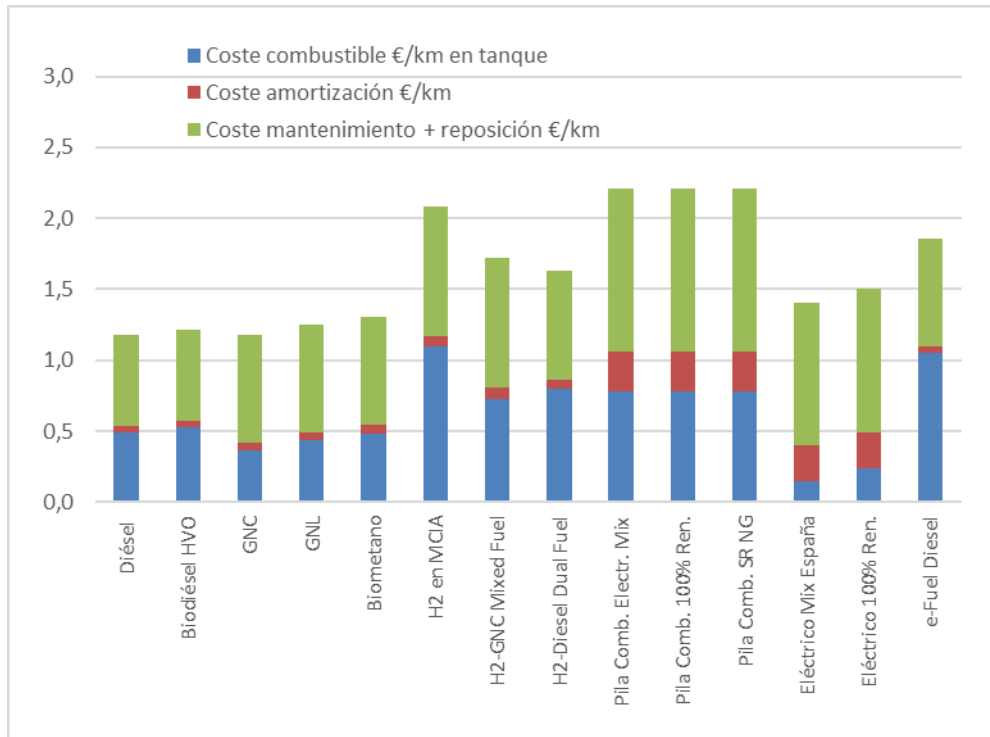


Ilustración 47. Coste total para la propiedad de cada alternativa, expresado en euros por kilómetro.

Como se puede observar, los sistemas basados en **hidrógeno** son **los que más coste** por kilómetro **tienen**. La razón es que el combustible es el más caro, además de que el sistema de almacenamiento tiene costes iniciales y de mantenimiento elevados. Si además a todo esto se le suma el coste y el mantenimiento de un sistema de pila de combustible, el coste se incrementa hasta superar los 2 €/km. La siguiente alternativa en términos de coste es la que utiliza **combustible sintético**. Este coste se **debe** exclusivamente **al alto precio del combustible**, ya que en términos de mantenimiento y amortización es prácticamente igual a un MCI alimentado con diésel.

En el escalón intermedio, con un coste de en torno a 1,5 €/km, se tiene la propulsión 100% eléctrica a batería. El coste de mantenimiento es el más bajo de todos, pero al **añadir un cambio de batería** durante la vida útil del vehículo, el coste de mantenimiento se dispara. Aun así, este coste ha bajado muchísimo en los últimos años y se espera que continúe haciéndolo.

Por último, las **alternativas más económicas**, son las que emplean MCI con **diésel, biodiésel, GNC, GNL y biometano**. Tienen un coste de entre 1,2 y 1,3 €/km. Es un coste muy bajo en comparación a las alternativas que usan hidrógeno, además de que usando biometano o biodiésel las emisiones se consideran nulas.

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones sobre las alternativas en los sistemas de propulsión

Para cumplir el objetivo principal de este trabajo, queda realizar una comparación cualitativa de las distintas alternativas para el sistema de propulsión presentadas y analizadas durante este trabajo. Para ello, se ha puntuado con una nota del 1 al 10 el comportamiento de cada alternativa en cada uno de los criterios que se consideran importantes para la comparación.

Los criterios que se proponen son los que se detallan a continuación:

- Masa del sistema de almacenamiento (combustible más contenedor o batería eléctrica).
- Volumen del sistema de almacenamiento (combustible más contenedor o batería eléctrica).
- Energía primaria consumida W-t-W por km
- Emisiones totales de CO₂ W-t-W por km
- Coste total para la propiedad por km

En la Tabla 14 se puede apreciar la puntuación obtenida por cada sistema de propulsión para cada criterio. El **valor numérico** es **mayor** (máximo 10) **cuanto mejor sea el comportamiento** (por ejemplo, menor masa o volumen de almacenamiento, menores emisiones o menor coste).

Tabla 14. Evaluación cualitativa de las distintas alternativas bajo diferentes criterios.

Sistema de propulsión	Masa Almacenamiento	Volumen Almacenamiento	Energía Primaria Consumida W-t-W	Emisiones CO ₂ Totales C-T-G	Coste Total Propiedad
Diésel	10	10	6	1	10
Biodiésel HVO	10	10	1	8	9
GNC	7	5	5	2	10
GNL	8	8	5	2	9
Biometano	7	5	2	9	8
H ₂ en MCIA	5	2	3	9	2
H ₂ -GNC Mixed Fuel	7	4	3	5	4
H ₂ -Diesel Dual Fuel	7	4	3	4	5
Pila Comb. Electr. Mix	3	2	4	3	1
Pila Comb. 100% Ren.	3	2	5	9	1
Pila Comb. SR NG	3	2	5	1	1
Eléctrico Mix España	1	1	8	7	5
Eléctrico 100% Ren.	1	1	10	8	4
e-Fuel Diesel	10	10	0	10	3

La misma información, pero organizada de forma gráfica, se presenta en la Ilustración 48.

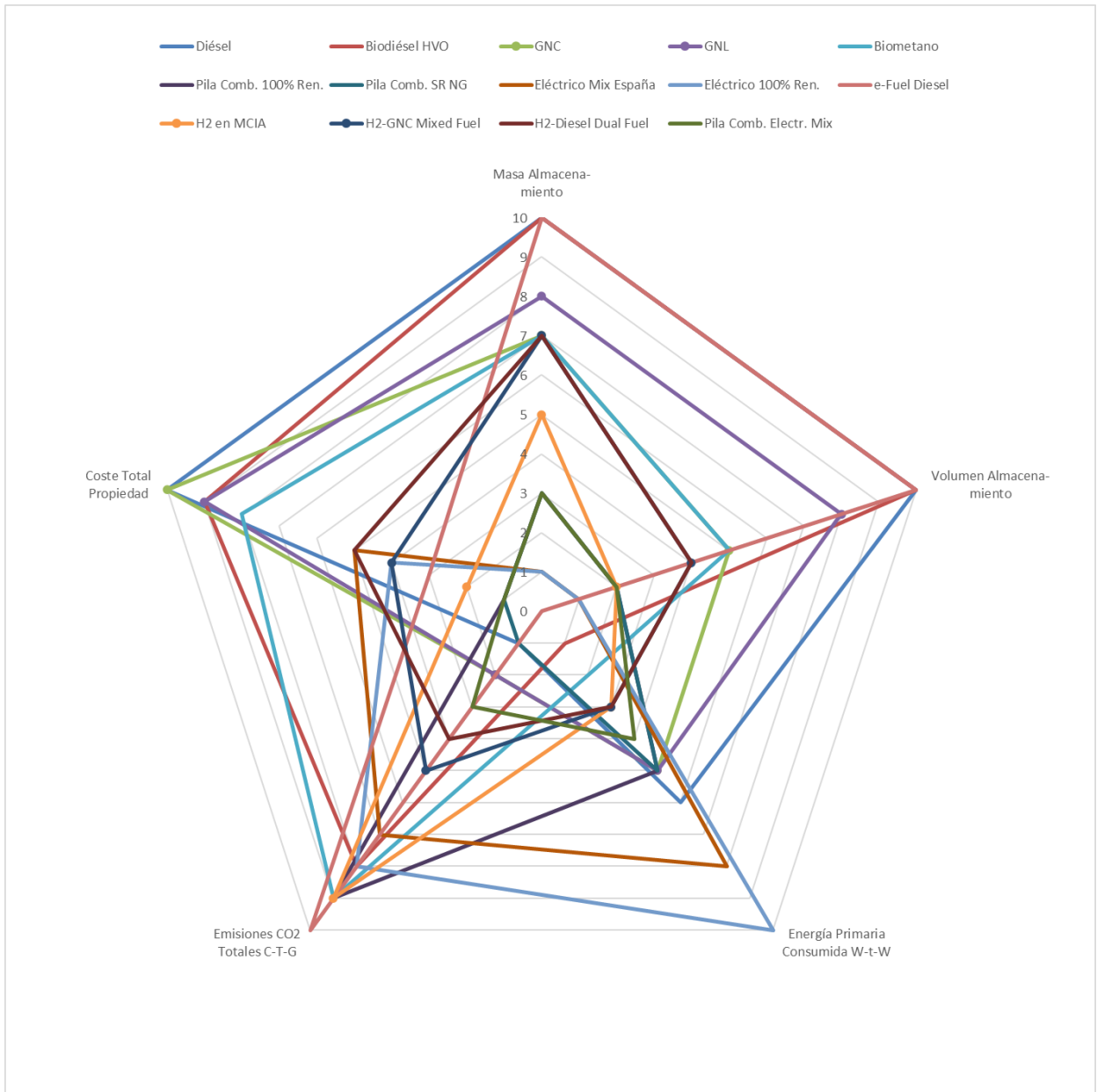


Ilustración 48. Representación cualitativa de las distintas alternativas frente a cada criterio.

Alternativamente, esta misma información se puede representar de otra forma, asignado una línea a cada criterio, mientras que los ejes son cada una de las 14 opciones de propulsión/combustible consideradas (Ilustración 49).

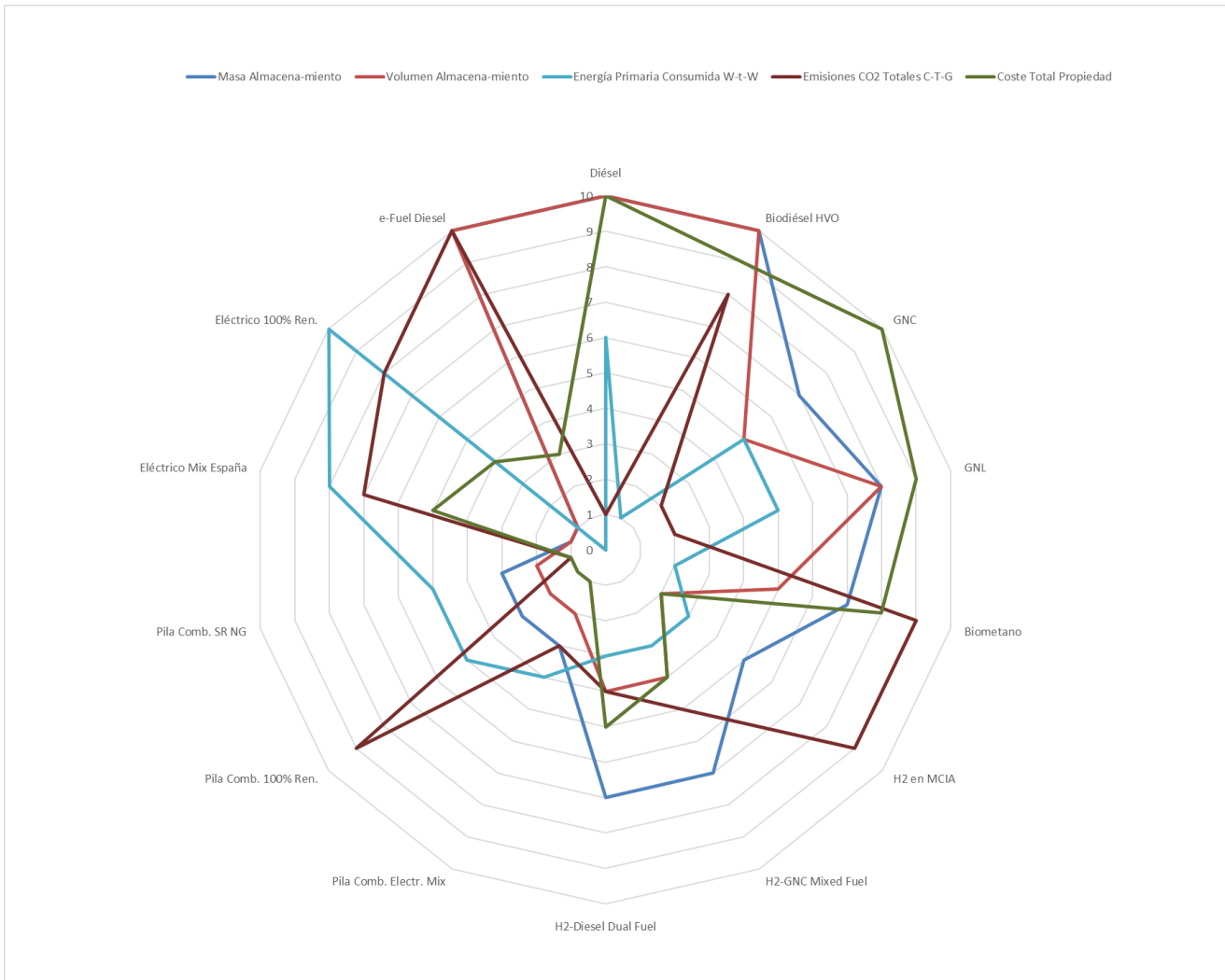


Ilustración 49. Representación cualitativa de la puntuación de cada criterio para cada una de las alternativas de propulsión.

Por la valoración asignada a cada alternativa/criterio, los **valores más alejados del centro son más favorables**, mientras que los más cercanos son más desfavorables. Como se puede observar, no hay una alternativa que sea suficientemente buena respecto a todos los criterios simultáneamente. Como ejemplo de ello, un sistema de propulsión basado en un MCIA alimentado con gasóleo tiene buenos valores de **masa y volumen de almacenamiento**, de **energía primaria consumida** y de **coste total para la propiedad**. Sin embargo, tiene un pésimo desempeño en cuanto a emisiones de CO₂ totales. Si se prioriza que el sistema de propulsión genere unas **emisiones de CO₂ totales** bajas, entonces hay otros parámetros, como la energía o el coste total para la propiedad, que son malos. Por tanto, la idoneidad de un sistema de propulsión dependerá en función de la importancia que se quiera a dar a cada criterio de evaluación.

En cuanto a **emisiones de CO₂** se refiere, la mejor alternativa es la que utiliza e-fuel, aunque también son muy interesantes el sistema de propulsión eléctrica 100% renovable, la pila de combustible con hidrógeno verde y los MCIA con biometano, H₂ y biodiésel.

Respecto a la **energía primaria consumida**, las únicas alternativas que tienen una buena puntuación son las de propulsión eléctrica, ya sea con electricidad renovable o del mix eléctrico español. El resto de las alternativas consumen mucha energía primaria y tienen puntuaciones inferiores a 6.

Por lo que respecta a la **masa y volumen de almacenamiento**, las mejores alternativas son las que usan MCIA con combustible líquido almacenado a presión atmosférica. Si el combustible se almacena presurizado, el volumen y la masa aumentan (el caso del GNC, el biometano y el H₂). El sistema de pila de combustible, como tiene más elementos que un MCIA además de combustible presurizado, tiene unos valores muy malos. En último lugar se encuentra el sistema de propulsión eléctrico, que debido al gran tamaño y densidad de la batería tiene los peores valores de masa y volumen del sistema de almacenamiento.

Finalmente, en cuanto al **coste total de la propiedad** se refiere, las alternativas más económicas son las que usan motores y sistemas de almacenamiento tradicionales (el caso de MCIA con diésel, biodiésel). Los sistemas de propulsión que usan GNC, GNL o biometano también tienen un coste muy bajo, ya que, aunque el sistema de almacenamiento sea más complejo, el combustible es económico. Los sistemas eléctricos y duales tienen un coste intermedio, ya que es un sistema parcialmente desarrollado. Por último, los que tienen un coste más elevado son los sistemas menos desarrollados, como son los basados en la combustión de hidrógeno o e-fuel y, en última instancia, los basados en pilas de combustible.

6.2. Sugerencias para desarrollos futuros

Durante la realización de este trabajo de fin de máster se han presentado numerosos temas con mucho potencial de desarrollo. Sería especialmente interesante trabajar en estas líneas de trabajo que se han dejado abiertas en el futuro cercano, ya que tienen la capacidad de avanzar en el objetivo de conseguir la neutralidad en carbono.

A continuación, se presentan sugerencias para desarrollos futuros directamente relacionadas con el trabajo realizado:

- Mejorar la estimación del efecto de la masa del almacenamiento sobre el consumo energético del vehículo en rueda.
- Considerar valores de energía en rueda por unidad de longitud que sean dependientes de las condiciones de operación.
- Utilizar valores de los rendimientos Tank-to-Well de cada una de las alternativas de propulsión consideradas que sean dependientes de las condiciones de operación.
- Considerar para futuras comparativas vehículos completamente equivalentes en cuanto a MMA, número de ejes, dimensiones, etc.

7. Bibliografía

Artículos y documentos relevantes consultados:

- Ceballos, J. J., Melgar, A., & Tinaut, F. V. (2021). Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine. *Energies*, 14(17), disponible en <https://doi.org/10.3390/en14175346>
- Chiralt, R. (2023). Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos en el Puerto de Valencia. TFG. ETSID. UPV, 2023
- GREET (2022). Model for Hydrogen Life Cycle GHG Emissions. Presentation at H2IQ Webinar. June 15, 2022.
- Prussi Matteo; Yugo Marta; De Prada Luis; Padella Monica; Edwards Robert. JEC W-T-W V5, disponible en <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213>
- Tinaut, F.V. (2022). Apuntes de la asignatura Hidrógeno, e-fuels y otros combustibles renovables. Máster en Sistemas Propulsivos, UPV, Valencia.
- Tinaut, F.V. (2020). Metodología usada en informe JEC W-T-W V5, Máster Ingeniería Automoción, Universidad De Valladolid.
- Tinaut, F.V. (2023). Tecnologías disponibles para la descarbonización de transporte por carretera (Taller informativo sobre hoja de ruta de descarbonización, para Alianza NetZeroMar, Junio 2023).

Páginas web (todas consultadas entre septiembre de 2023 y enero de 2024):

- Blog escuela de conductores. Precio aproximado de una cabeza tractora diésel en España, disponible en <https://www.escueladeconductores.es/ver/1570/cuanto-vale-un-camion-y-otras-consideraciones-si-quieres-ser-camionero.html#:~:text=Comprar%20un%20cami%C3%B3n%20es%20una,000%20euros%20para%20el%20remolque>
- Centro Nacional del Hidrógeno. Funcionamiento y tipos de Pila de combustible, disponible en <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- CIC energigune. Formas de producción de H2, disponible en <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Grupo Concesur. Presentación del Mercedes GenH2, disponible en <https://grupoconcesur.es/actualidad/mercedes-genh2-hidrogeno/>
- Hyundai. Camión de pila de combustible de hidrógeno XCIENT Fuel Cell, disponible en <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-drive/tendencias/datos-camion-hidrogeno-hyundai-xcient-fuel-cell> y en <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-tractor-fcev>
- Mercedes-Benz Trucks. Consumo de la cabeza tractora e-Actros: https://www.mercedes-benz-trucks.com/es_ES/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Conducción diaria permitida, disponible en <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/inspeccion-y-seguridad-en-el-transporte/tiempos-de-conduccion-y-descanso/conduccion/tiempos-de-conduccion>

- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías 2023, disponible en <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/servicios-al-transportista/observatorios-del-transporte/observatorios-del-transporte-de-mercancias-por-carretera>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Pesos y dimensiones de los Camiones, disponible en <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/inspeccion-y-seguridad-en-el-transporte/pesos-y-dimensiones/pesos/pesos-trailer/trailer-de-mas-de-cuatro-ejes> y en <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/inspeccion-y-seguridad-en-el-transporte/pesos-y-dimensiones/pesos/pesos-trailer/trailer-de-cuatro-ejes>
- Revista híbridos y eléctricos. Planteamiento sobre la capacidad de carga del Semi, disponible en: https://www.hibridosyelectricos.com/camiones/tesla-semi-bateria-900-kwh_65616_102.html
- Revista Híbridos y eléctricos. Presentación del camión de pila de combustible Quantron: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/quantron-presenta-camion-pila-hidrogeno-1500-km-autonomia_62642_102.html
- Revista Motor16. Artículo sobre el Corolla GR YARIS, disponible en <https://www.motor16.com/deportes/este-toyota-corolla-alimentado-por-hidrogeno-completa-las-24-horas-de-fuji/>
- Revista Motorpasión. Estimación del peso de la batería del Tesla Semi, disponible en: <https://www.motorpasion.com/tesla/tesla-semi-podria-tener-bateria-casi-6-toneladas-realidad-no-problema>
- Revista Motorpasión. Prueba de conducción y consumo del Toyota Mirai de segunda generación: <https://www.motorpasion.com/pruebas-de-coches/toyota-mirai-2021-prueba-contacto>
- Revista Motorsport. Publicación de algunos datos de potencia y eficiencia del Audi RS Q e-tron E2, disponible en <https://es.motorsport.com/dakar/news/detalles-tecnicos-audi-rs-q-etron-coche-carlos-sainz-rally-dakar-2023/10410203/>
- Revista Solocamión. Prueba de consumo REAL Mercedes ACTROS, disponible en <https://solocamion.es/mercedes-benz-actros-1848-e6-equilibrado/>
- Revista Transporte3. Prueba de conducción del volvo FH de gas natural, disponible en <https://www.transporte3.com/noticia/13715/volvo-fh-460-cv-gnl-una-respuesta-contundente--prueba>
- Revista Transporte3. Prueba de conducción y consumo del Iveco STRAILS, disponible en: <https://www.transporte3.com/noticia/14144/iveco-stralis-np-460-ahorro-record-con-gas-natural>
- Revista Transporte3. Prueba de conducción y consumo del Volvo FH, disponible en <https://www.transporte3.com/noticia/19740/prueba--volvo-fh-460-cv-i-save-con-tc-una-respuesta-aun-mas-perfecta->
- Tesla. Datos oficiales del Tesla Semi, disponible en <https://www.tesla.com/semi>
- Volvo Trucks. Consumo Volvo FH Electric, disponible en <https://www.volvotrucks.es/es-es/news/magazine-online/2022/jan/volvo-fh-electric-excels-in-first-road-test.html>

Presupuesto

El presupuesto se compone de las siguientes partes: el coste de la mano de obra, el coste de las herramientas utilizadas, el beneficio industrial aplicado y los gastos generales.

Para obtener el coste de la mano de obra, se han establecido las horas dedicadas a cada una de las tareas realizadas para poder completar el trabajo. Estas tareas se componen de: búsqueda de alternativas de propulsión, investigación sobre el marco legal, proceso de cálculo de las distintas variables, representación gráfica de los resultados, revisión de los resultados y supervisión del tutor. El coste unitario de la mano de obra se corresponde con la mínima bolsa económica de ayuda que estipula la UPV. En la siguiente tabla se puede apreciar:

Tabla 15. Coste de la Mano de Obra.

Coste Mano de Obra			
Descripción	Coste unitario (€/h)	Unidades (h)	Importe (€)
Búsqueda de alternativas de propulsión	4,60 €	80	368,00 €
Investigación sobre el marco legal	4,60 €	45	207,00 €
Proceso de cálculo de las distintas variables	4,60 €	90	414,00 €
Representación gráfica de los resultados	4,60 €	80	368,00 €
Revisión de los resultados	4,60 €	70	322,00 €
Supervisión del tutor	42,00 €	100	4.200,00 €
TOTAL			5.879,00 €

En cuanto a las herramientas gráficas utilizadas, son básicamente el paquete Office. En este caso no suponen ningún coste adicional porque la UPV las ofrece de manera gratuita a sus estudiantes.

Finalmente, el beneficio industrial que se ha propuesto es de un 10% y los gastos generales de un 12%. Con todo esto, y un IVA aplicable del 21%, se obtiene el siguiente presupuesto Global:

Tabla 16. Presupuesto Global.

Presupuesto Global	
Descripción	Importe
Coste Mano de Obra	5.879,00 €
Gastos generales (12%)	705,48 €
Beneficio Industrial (10%)	587,90 €
SUBTOTAL	7.172,38 €
IVA (21%)	1.506,20 €
TOTAL	8.678,58 €

Finalmente, el coste total del trabajo con IVA incluido asciende a **OCHO MIL SEISCIENTOS SETENTA Y OCHO EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**