



Trabajo Fin de Grado

Análisis de las prestaciones e implantación de un
vehículo de bomberos con tecnología del
hidrógeno

Performance analysis and implementation of a
firefighting vehicle with hydrogen technology

Autor
Diego Magallón Jorcano

Directores
Emilio Larrodé Pellicer
Guillermo Matute Gómez

Grado en Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2023

*Dedicado a mi familia, mi mujer, mis padres y mi hermano,
sin cuya ayuda este trabajo nunca hubiera visto la luz.*

Gracias por creer siempre en mí.

*Especial agradecimiento a mis directores de trabajo,
Emilio Larrodé y Guillermo Matute,
por haberme guiado en este maravilloso camino.*

*Y también al Jefe del Servicio de Bomberos del Ayuntamiento de Zaragoza,
Eduardo Sánchez, quien me inspiró en la idea del trabajo.*

*Y finalmente,
a todos los compañeros bomberos que han colaborado
en la realización de este trabajo, sobre todo, del parque de Calatayud.*

Análisis de las prestaciones e implantación de un vehículo de bomberos con tecnología del hidrógeno

RESUMEN

Las políticas internacionales sobre cambio climático son cada vez más críticas con el sector de la movilidad, ya que es uno de los principales responsables de las emisiones de CO₂. Ante esta situación, la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles ha originado la aparición de varias opciones tecnológicas, entre las que se encuentran los vehículos de hidrógeno.

El presente proyecto busca contribuir a la investigación sobre el despliegue de los vehículos propulsados por pila de hidrógeno. Para ello, se centra en el análisis de la utilización de un vehículo pesado de estas características por un servicio de extinción y prevención y extinción de incendios. El estudio parte de un camión de bomberos real, que sirve de base para el cálculo energético involucrado en cada trayecto, permitiendo así conocer las prestaciones que debería reunir su homólogo de hidrógeno.

Para garantizar la operatividad del camión en diversas situaciones, se plantean cuatro escenarios con distinto grado de exigencia, que sirven para realizar un modelado teórico del futuro camión de H₂. A su vez, el modelo permite realizar un diseño de la cadena de tracción con todos sus componentes. Posteriormente se validará la solución propuesta.

El proyecto completa el análisis con el estudio comparativo de otros aspectos fundamentales, como son el ámbito económico, y el medioambiental, imprescindibles ante un posible despliegue de esta alternativa tecnológica.

El resultado de esta investigación ayudará a comprender las barreras a las que pueden enfrentarse los diferentes actores del sector (fabricantes de camiones, carroceros de vehículos de bomberos, autoridades públicas con servicios de extinción de incendios), a la hora de llevar a cabo la transición hacia una movilidad más sostenible.

Contenido

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. MOTIVACIÓN	6
2.1. El cambio climático y sus consecuencias	6
2.2. El responsable: El ser humano y el CO ₂	6
2.3. Medidas para frenar el cambio climático	9
2.4. El sector del transporte y su descarbonización	10
2.5. Tecnologías alternativas en camiones	11
3. OBJETIVOS	13
3.1. Objetivo principal	13
3.2. Objetivos secundarios	13
4. ESTADO DEL ARTE	14
4.1. Los vehículos de hidrógeno	14
4.2. Experiencias previas con hidrógeno en camiones	15
4.3. Tipos de vehículos usados actualmente por los servicios de bomberos	16
4.4. Caso de estudio	17
4.5. Vehículos de bomberos eléctricos: primeras experiencias	18
4.6. Experiencias previas con hidrógeno en vehículos de bomberos	19
5. Estudio	20
5.1. Diseño	20
5.1.1. Normativa para el diseño de vehículos de extinción de incendios	20
5.1.2. Elementos específicos de la tracción mediante motor diésel	21
5.1.3. Elementos específicos de la tracción mediante pila de hidrógeno	23
5.2. Criterios de análisis	25
5.2.1. Técnico-Operativo: Especificaciones dinámicas	25
5.2.2. Análisis económico	43
5.2.3. Impacto Medioambiental	47
5.2.4. Criterios adicionales	55
5.2.4.1. Adaptación de la cadena de tracción	55
5.2.4.2. Infraestructura de carga	58
6. CONCLUSIONES	60
7. BIBLIOGRAFÍA	62
8. GLOSARIO	63
Índice de figuras y tablas	64

1. INTRODUCCIÓN

La lucha contra el cambio climático está propiciando que la política internacional promueva, cada vez más, políticas y normativas que buscan reducir el impacto medioambiental de la actividad humana. Como se presentará en este proyecto, uno de los sectores sobre el que más se está centrándolo es el sector del transporte por carretera, ya que se trata de uno de los principales contribuyentes a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, y además cuenta con un enorme potencial de mejora.

Las principales medidas para descarbonizar este sector van encaminadas a reducir el uso de combustibles fósiles. Los avances tecnológicos están contribuyendo al desarrollo de nuevos medios que utilizan fuentes de energía menos contaminantes. Sin embargo, todavía existe una gran incertidumbre sobre cómo será el escenario del sector del transporte en las futuras décadas, ya que, entre otros aspectos, existen varias tecnologías con diferentes grados de madurez que podrían decantar la balanza hacia uno u otro lado.

Una de dichas tecnologías se basa en el uso del hidrógeno como fuente de energía para la propulsión del vehículo. En esencia, se trata de un vehículo impulsado por un motor eléctrico, que genera su propia energía mediante la electrólisis del hidrógeno. Para ello, estos vehículos disponen de un depósito de almacenamiento de hidrógeno, que se transporta hasta una “pila de combustible”, donde éste se mezcla con el oxígeno del aire para producir una reacción química denominada electrólisis. El resultado es la liberación de energía y vapor de agua. De este modo, se consiguen reducir las emisiones de gases nocivos como el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), etc. Sin embargo, garantizar que esta alternativa a los combustibles tradicionales es realmente más sostenible requiere de un análisis más exhaustivo, donde también se aborden otros aspectos como la fabricación de los elementos necesarios para construir estos vehículos o la forma en la que se produce el hidrógeno, entre otros.

A pesar de que se trata de una tecnología prometedora, los vehículos de hidrógeno se encuentran en una fase temprana de desarrollo en comparación con otras alternativas. Por este motivo todavía precisan de un gran esfuerzo en actividades de I+D, así como de experiencias de demostración reales, y de un mayor apoyo por parte de las autoridades públicas a nivel nacional e internacional. Actualmente existen unos pocos fabricantes que comercializan vehículos de este tipo, pero con importantes limitaciones: el mercado está centrado en la gama de los turismos, la continuidad de los modelos está en el aire, y el número de unidades que se producen es muy reducido. Es una situación muy diferente de la que se da en los automóviles eléctricos.

Si se pone el foco en la gama de los vehículos pesados, el escenario es todavía más incierto. Existen muchos proyectos de I+D que están estudiando la viabilidad de los vehículos pesados de hidrógeno, e incluso llegando a implantar alguna experiencia piloto, aunque aislada. Sin embargo, apenas existen uno o dos fabricantes con un modelo completamente demostrado y que pueda considerarse comercializable.

El presente proyecto abordará este último punto, con el fin de **contribuir a esclarecer la viabilidad del despliegue de los vehículos pesados propulsados por pila de hidrógeno**, aportando su grano de arena en la descarbonización del sector del transporte y en la lucha contra el cambio climático.

Concretamente, el proyecto tiene como objetivo analizar las prestaciones de un camión de motorización diésel, para estudiar si podría desempeñar las tareas para las que ha sido concebido con una cadena de tracción mediante pila de combustible de hidrógeno en lugar de la que incorpora y que utiliza gasoil.

Como se ha comentado, existen ya proyectos de I+D que están analizando dicha viabilidad, aunque por lo general se dirigen a camiones que realizan medias y grandes rutas. El proyecto, por el contrario, busca realizar este análisis **para un vehículo de extinción de incendios**. A nivel internacional, tan solo se ha podido encontrar un proyecto similar, financiado por la Comisión Europea a través de uno de sus programas de I+D+i.

La actividad a la que se dirigen los camiones de bomberos les otorgan un funcionamiento y unas características muy concretas: arranques rápidos, regímenes de funcionamiento muy variables (frenadas, acelerones), situaciones extremas, con acoplamientos de toma de fuerza, etc. En este caso en concreto se utilizará como base del estudio un camión denominado “Autobomba Urbana Pesada”, del Servicio de Prevención y Extinción de Incendios (SPEIs) de la Diputación Provincial de Zaragoza.

Para abordar el trabajo, el primer paso es hacer un estudio de la tecnología y así conocer el funcionamiento de los dos sistemas analizados (gasoil vs. hidrógeno) y los elementos que los componen. Con esto se conseguirá identificar qué partes podrán ser removidas del chasis base para poder alojar a los nuevos componentes.

De forma paralela, será necesario estudiar las condiciones de trabajo a las que está sometida la autobomba urbana pesada, con el fin de identificar las prestaciones exigibles a un vehículo de este tipo. Así **se desarrollará el modelo teórico y se dimensionará la nueva cadena de tracción** y el sistema de alimentación de energía. Para ello, en primer lugar, se obtendrán datos vía GPS de varias intervenciones a las que asiste este vehículo. Estos datos tendrán que ser validados y posteriormente filtrados para garantizar la fiabilidad de los resultados. En total se elegirán **cuatro escenarios con diferentes niveles de exigencia** para el camión, con el fin de poder abarcar un amplio rango de situaciones en las que interviene. Posteriormente, y utilizando la herramienta Excel, se alcanzarán los modelos teóricos de la cadena de tracción original y nueva. Finalmente se validará para comprobar que cumple los requisitos exigibles, o determinar en qué grado puede cumplirlos.

Con la cadena de tracción dimensionada, será posible estudiar cómo se integrarán los nuevos componentes en el camión, en sustitución de los que pertenecen a la cadena de tracción de gasoil. El volumen disponible en este tipo de vehículos es limitado, al contar con cisterna de agua y gran cantidad de espacio ocupado por herramientas. Adicionalmente, se analizarán otros aspectos abarcando el ciclo de vida completo del camión, y que deberán ser tenidos en cuenta para el despliegue de este tipo de flotas.

Por un lado, se realizará un **análisis económico** para conocer cuál es el desglose de los costes asociados a cada tipo de camión. Esto permitirá a las administraciones saber el alcance real de la inversión en un camión de estas características.

Por otro lado, se llevará a cabo un **análisis comparativo del impacto medioambiental**, que comprenderá el estudio de las emisiones de GEI que genera cada uno de los dos camiones y que comprenderá la práctica totalidad de su ciclo de vida.

Todo ello en conjunto servirá para recopilar los puntos fuertes y los puntos débiles de la incorporación de este tipo de vehículos en las flotas de los servicios de extinción y prevención de incendios, así como abrir la puerta a nuevas líneas de investigación.

2. MOTIVACIÓN

2.1. El cambio climático y sus consecuencias

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), presentó recientemente su sexto informe [1], en el que lanzaba un claro mensaje: la acción del ser humano está directamente relacionada con la emergencia climática que vive el planeta y es uno de sus principales culpables. Desde la época pre-industrial se estima que la temperatura media del planeta ha subido 1°C, y actualmente continúa subiendo a una ratio de 0,2°C por década. Cada pequeño incremento de temperatura provoca la aparición de nuevos riesgos y supone una dificultad añadida a la hora de gestionarlos.

De acuerdo a las proyecciones del IPCC, el ser humano ha propiciado ya algunos cambios irreversibles, y está contribuyendo a que los eventos extremos climáticos se produzcan con mayor frecuencia e intensidad, como el aumento de temperatura global, la pérdida de grandes masas de hielo, el incremento del nivel del mar o las sequías e inundaciones.

El informe apunta que el calentamiento global superará el 1,5°C e incluso los 2°C durante el siglo XXI si no se producen reducciones profundas en las emisiones a la atmósfera, provocando, de ser así, daños irreversibles en los ecosistemas, la biodiversidad y los seres humanos.

2.2. El responsable: El ser humano y el CO₂

El IPCC señala un claro responsable ante el cambio climático, el ser humano y su actividad, especialmente ligada a la emisión de sustancias nocivas para el medioambiente. Entre estas sustancias se encuentran los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Una serie de compuestos que, si bien permiten aislarnos del espacio exterior y mantener una temperatura promedio global de 15°C, cuando se encuentran en altas concentraciones dificultan la salida de parte de la radiación que la Tierra recibe, calentando con ello la atmósfera.

Los GEI más perjudiciales fueron recogidos por el Protocolo de Kioto. El protocolo comprometía a los países que lo han ratificado a limitar y reducir las emisiones de estos gases para hacer frente a la contaminación atmosférica mundial. De todos los GEI, uno de los de mayor influencia sobre el calentamiento global es el dióxido de carbono (CO₂), principalmente por las grandes cantidades que se generan por las actividades humanas a través de la combustión de materiales fósiles.

Múltiples organismos han analizado la evolución de este gas, y sus conclusiones muestran que la generación de CO₂ se ha disparado de forma exponencial desde el comienzo de la segunda mitad del siglo XX, como recoge la Figura 1. La pandemia mundial originada por el COVID-19, tuvo un claro impacto en la demanda energética de 2020, llegando a reducir las emisiones de CO₂ hasta un 5,2%. Sin embargo, la rápida recuperación económica no solo ha hecho que las emisiones vuelvan a los valores previos a la pandemia, si no que se han superado en cerca de 200 Mt los valores de 2019, hasta alcanzar las 36,3 GT en 2021.

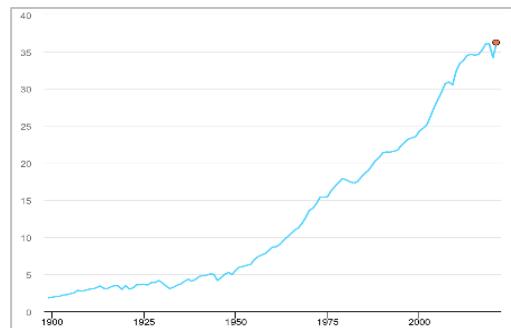


Figura 1: CO₂ emissions [Gt] from energy combustion and industrial processes, 1900-2021

El CO₂ se produce, entre otros, durante la combustión de combustibles fósiles, que son empleados en una amplia variedad de sectores productivos. En la Figura 2, elaborada por la Dirección General de Transporte y Movilidad de la Comisión Europea, se aprecia la dependencia energética que, a pesar de los esfuerzos, tiene la actividad humana de los combustibles fósiles.

	Mtoe	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019	2020
Final energy consumption by fuel/product									
Solid fuels	104.6	64.3	42.5	35.9	33.2	28.9	24.7	23.2	
Oil & petroleum products	374.2	381.1	396.7	405.2	366.2	338.8	346.0	310.3	
Gas	170.8	187.0	205.1	222.8	217.7	192.3	199.1	193.9	
Electricity	162.3	168.8	189.0	209.4	215.9	210.7	213.3	205.1	
Renewables	38.6	43.6	48.8	60.7	85.7	89.7	104.1	104.2	
Other (**)	56.0	47.8	43.9	52.6	54.4	49.1	50.7	49.0	
by sector									
Industry	310.2	271.7	271.0	275.2	243.9	233.7	239.4	231.2	
Transport (****)	220.7	235.9	262.9	281.6	280.0	272.8	289.0	252.0	
Rail	7.5	7.5	7.4	6.8	6.3	5.4	5.3	4.7	
Road	201.6	218.0	243.2	260.2	260.6	255.6	270.0	238.2	
Domestic aviation	5.0	4.3	5.7	5.8	5.6	5.4	6.5	3.1	
Domestic navigation	5.2	5.1	5.2	5.6	5.0	3.9	4.2	3.6	
Consumption in pipeline transport, etc.	1.4	1.1	1.4	3.2	2.4	2.5	3.0	2.3	
Households	239.8	249.7	248.5	266.2	278.9	245.0	248.2	248.2	
Agriculture and fishing	33.4	31.3	28.4	28.5	26.7	25.7	29.2	29.3	
Services, etc.	102.3	104.0	115.2	135.2	143.7	132.2	132.0	125.0	

Figura 2: Consumo energético por tipo de fuente y sector para los estados de la UE

En ella se observa que en 2020 el uso de combustibles fósiles (petróleo, derivados del petróleo y gas) representó el 56,92% del consumo total energético de los países de la Unión Europea, siendo los sectores más intensivos en el uso de la energía el del **transporte** (28,4%), el **doméstico** (28,0%) y el **industrial** (26,1%).

Con los datos proporcionados por la Comisión Europea, también es posible analizar la influencia que estos sectores productivos tienen en las emisiones de GEI, como muestra la Figura 3.

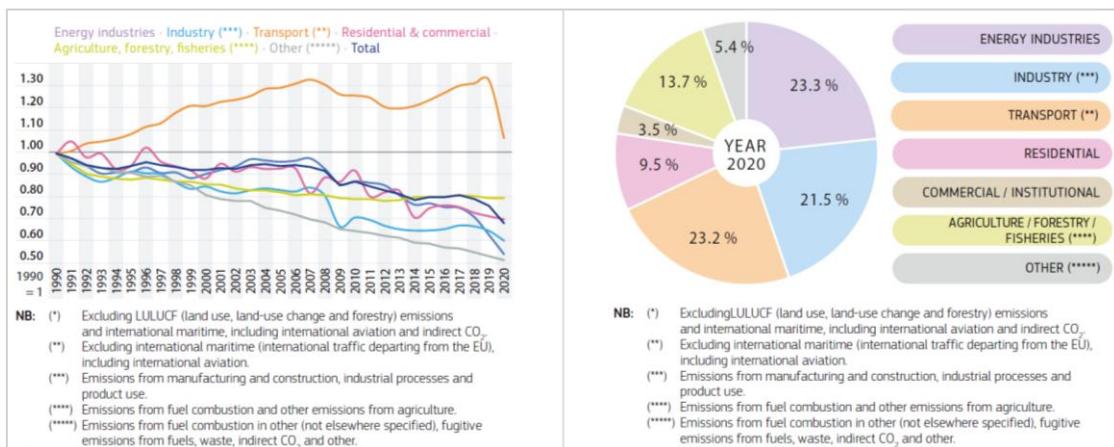


Figura 3: Emisiones de GEI en los estados de la UE (Millones de T de CO₂ equivalentes)

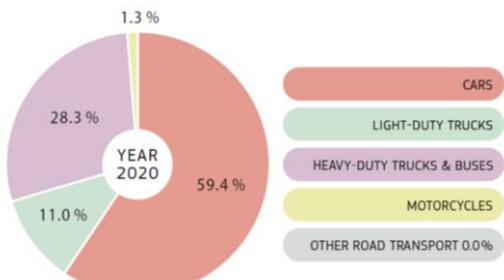
Los datos ponen de manifiesto que el sector del transporte representa uno de los principales focos de emisión de CO₂ (23,2%). Y es que se trata de un sector basado principalmente en el uso de combustibles fósiles.

Este sector está integrado por medios de transporte muy diferentes, por lo que es necesario profundizar en él a fin de conocer realmente qué sistemas de movilidad son los más críticos. Los datos de la Figura 4 muestran que el transporte por carretera genera alrededor de 2/3 de las emisiones ocasionadas por la movilidad de personas y mercancías. Nuevamente, es necesario tener en cuenta que el transporte por carretera lo integran medios y usos muy diferentes. Una vez más, se requiere un análisis más detallado para identificar los principales focos generadores de GEI, que se refleja a través de la Figura 5.



NB: (*) Excluding international bunkers (international traffic departing from the EU).
 (**) Including international bunkers and indirect CO₂ but excluding LULUCF (land use, land-use change and forestry).
 (*** Excluding indirect emissions from electricity consumption.
 (****) Combustion emissions from all remaining transport activities including pipeline transportation, ground activities in airports and harbours, and off-road activities.
 (*****) Total transport share in total emissions.

Figura 4: Emisiones de GEI (%) del sector del transporte en los estados de la UE



NB: (**) Including international bunkers and indirect CO₂ (land use, land-use change and forestry).
 (*** Total transport share in total emissions.

Figura 5: Emisiones de GEI (%) del sector del transporte por carretera en los estados de la UE

De este modo se obtiene que de cada 4 toneladas de CO₂ emitidas por los vehículos europeos, algo más de 1 es producida por los vehículos pesados (camiones y autobuses). Pero, ¿cómo saber realmente el peso que tienen dichos vehículos sobre las emisiones?.

En 2020 la flota de turismos en la UE ascendía a 246,3 millones. Por su parte, los vehículos pesados y medios alcanzaban la cifra de 6,23 millones (7,07 si se incluyen autobuses). De este modo, a pesar de representar tan solo el 2,55% del tráfico en Europea, **los camiones y los autobuses generan el 39,3% de las emisiones de CO₂ del sector.**

Para corroborar que no se trata de un hecho exclusivo de la Unión Europea, también se han tomado datos del informe de la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA) sobre las emisiones de GEI del sector del transporte [].

Como refleja la Figura 6 Este sector constituye uno de los principales contribuyentes a las emisiones de GEI de Estados Unidos, ya que, a pesar de la pandemia, contabilizó el 27% de las emisiones de 2020, una cifra similar a la de los años previos a la pandemia.

Tal y como se ha procedido para el caso de la Unión Europea, la Figura 7 desglosa la procedencia de los GEI, con el fin de conocer exactamente dónde se están occasionando las emisiones. De este modo se obtiene que los turismos y vehículos ligeros superan el 50% del total de dichas emisiones, y los camiones de peso medio y superior alcanzan el 26%.

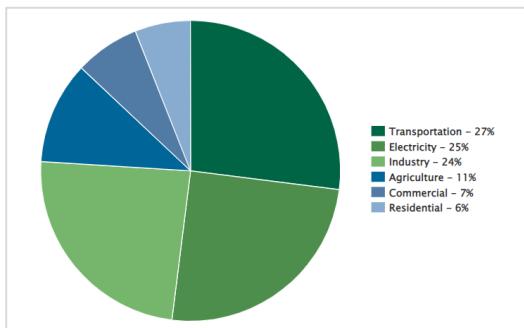


Figura 6: Emisiones de GEI en USA por sector en 2020

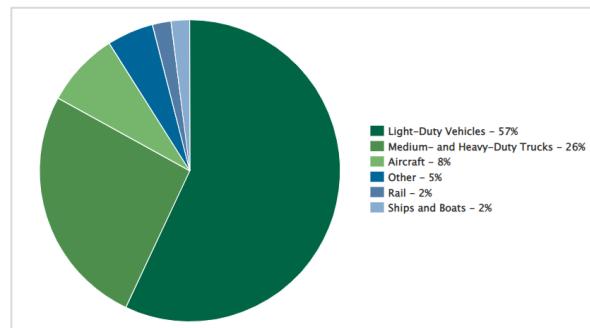


Figura 7: Emisiones de GEI en el sector del transporte por medio. 2020

2.3. Medidas para frenar el cambio climático

El Consejo Europeo aprobó en 2014 el Marco de Políticas de Energía y Cambio Climático 2021-2030 (“Marco 2030”) con el fin de establecer los nuevos objetivos medioambientales para la nueva década.

Posteriormente, la Comisión Europea suscribiría en 2020 el Pacto Verde Europeo, una serie de iniciativas políticas encaminadas a conseguir que la UE sea climáticamente neutra en 2050. Este nuevo impulso hacia la sostenibilidad modificaría algunos de los objetivos del Marco 2030 para hacerlos más ambiciosos, estableciendo para esa fecha intermedia las siguientes metas:

- Un 55% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con 1990.
- Un 32% de energías renovables en el consumo de energía.
- Un 32,5% de mejora de la eficiencia energética.

El sector del transporte, como se ha visto anteriormente, sería uno de los principales actores sobre los que las políticas europeas pondrían el foco. Y es que a pesar de ser uno de los elementos clave de la economía comunitaria (representa más del 9% del Producto Interior Bruto y da trabajo a unos 11 millones de personas) [6], también es uno de los principales contribuyentes a la contaminación atmosférica y al cambio climático, por lo que reducir su huella de carbono es clave en la consecución de los ambiciosos objetivos medioambientales de la UE.

Por ejemplo, a partir de 2026, el transporte por carretera se incluirá en el mercado de emisiones, estableciendo un precio a la contaminación generada, lo que pretende estimular el uso de combustibles más limpios y reinvertir en tecnologías verdes.

Además, junto a la reducción de emisiones del 55% para 2030, se ha establecido un importante hito para el año 2035. En esa fecha, las emisiones de los nuevos vehículos deberán ser nulas, lo que deja en el aire el futuro de los motores de gasolina, diésel, gas e híbridos, y abre la puerta a nuevas tecnologías.

2.4. El sector del transporte y su descarbonización

Una de las principales herramientas para conseguir la transición del sector hacia las cero o prácticamente nulas emisiones, se basa en conseguir una flota más respetuosa con el medio ambiente. Para ello, es necesario analizar cómo es el parque móvil europeo, con el fin de conocer el punto de partida hacia la descarbonización.

De acuerdo a los datos de la Figura 8, recopilados por la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles (ACEA), el número de vehículos en los países europeos ascendió en 2020 a 281.975.401 unidades [7], incluyendo desde vehículos utilitarios hasta autobuses o camiones pesados. Como se desprende de la Figura 9 el número de camiones en los países mencionados crece paulatinamente cada año, habiendo alcanzado los 6.230.100 vehículos en 2020. Como ya se ha indicado antes, esto representa solamente el 2,21% del total, pero equivale al 28% de las emisiones de CO₂, por lo que cuenta con un enorme potencial de actuación y mejora.

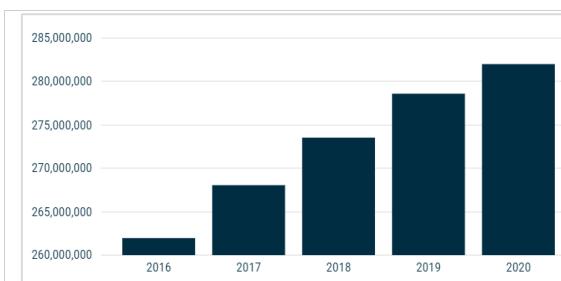


Figura 8: Total de vehículos en uso en Europa (unidades)

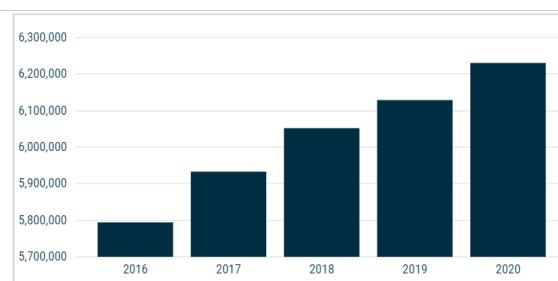


Figura 9: Total de camiones en Europa (unidades)

Para adaptarse a las cada vez más restrictivas políticas medioambientales, desde hace algunos años los fabricantes de vehículos han comenzado a apostar por cadenas de tracción alternativas, basadas en otras fuentes de energía. De las distintas opciones que han visto la luz, existen unas pocas que se postulan como sólidas alternativas a los medios de transporte convencionales.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de estos últimos años, los vehículos propulsados por fuentes alternativas todavía representan una porción pequeña de la flota de la UE, concretamente el 5,3% (Ver Figura 10). De todos ellos, los distintos tipos de vehículos eléctricos son los que lideran el cambio, puesto que los híbridos constituyen el 1,2%, y los eléctricos puros así como los híbridos recargables son el 0,5% y 0,6% respectivamente. Así, los vehículos propulsados por combustibles diesel son todavía los predominantes en todos los países de la UE.

Si se pone el foco sobre el segmento de los **camiones**, se obtiene que el 96,3% de todos ellos tienen motor Diesel, mientras que los de gasolina son menos del 1% de la flota total. Por el contrario, los camiones con cadenas de tracción de cero emisiones constituyen tan solo el 0,24%, aunque esto supone un importante aumento ya que en 2019 fueron el 0,04%.

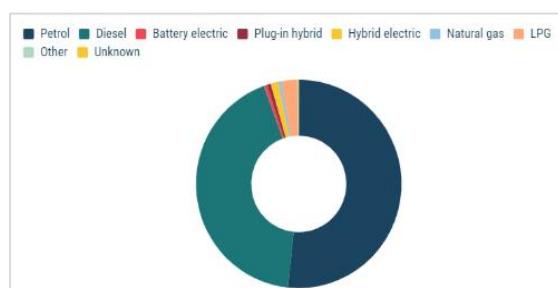


Figura 10: Vehículos (turismos) en uso en Europa por fuente de energía. 2020.

Petrol	Diesel	Battery electric	Plug-in hybrid	Hybrid electric	Natural gas	LPG	Other	Unknown
0.7 %	96.3 %	0.24 %	0.00 %	0.02 %	0.5 %	0.1 %	0.20 %	2.0 %

Tabla 1: Tipos de vehículos pesados por tecnología

Como muestran estas figuras, a pesar de que el número de vehículos con tecnologías más sostenibles crece cada año, ese aumento todavía se produce con una tasa muy baja respecto a la totalidad de la flota europea. Y si nos centramos en la categoría del transporte pesado, los datos son aún peores, ya que apenas existen alternativas sólidas a la motorización diésel. A pesar de que puedan parecer datos desalentadores, lo cierto es que ello implica que estos sectores, y especialmente el de los vehículos pesados, cuentan con un enorme potencial de mejora. Sin embargo, a día de hoy, estas tecnologías todavía se encuentran en fases muy diferentes de desarrollo, por lo que es preciso un mayor esfuerzo en todas las áreas, desde la investigación a través de proyectos de I+D+i, hasta la concienciación social y el apoyo y promoción por parte de las administraciones públicas.

2.5. Tecnologías alternativas en camiones

Un informe elaborado por el partenariado público-privado Clean Hydrogen Joint Undertaking sobre los camiones propulsados por pila de hidrógeno (FCH-HDT por sus siglas en inglés), realizó una comparación de las diversas tecnologías que existen hoy en día para postularse como sucesoras de los motores de combustión fósil. El estudio se realizó fundamentándose en base a tres parámetros principales:

1. Nivel de madurez tecnológica
2. Disponibilidad de repostaje e infraestructura de carga
3. Potencial de reducción de emisiones en toda la cadena de valor del combustible

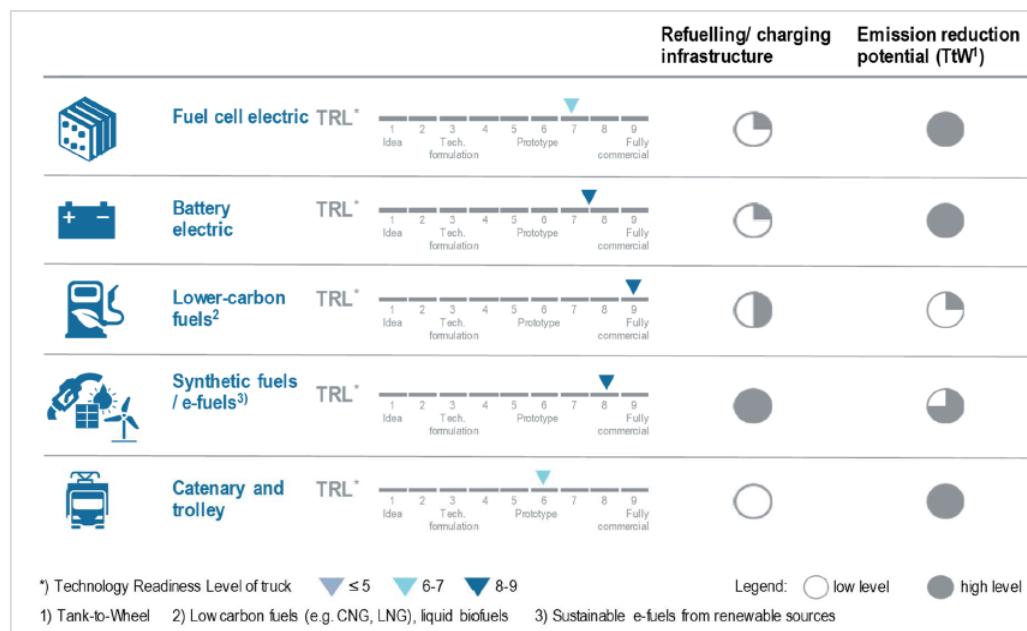


Figura 12: Comparación de la madurez tecnológica de distintas cadenas de tracción en camiones

De acuerdo a los datos recogidos por el Clean Hydrogen JU, la situación actual de las distintas opciones varía sustancialmente de unas a otras, si bien por lo general uno de los mayores obstáculos a los que se enfrentan todas ellas es el despliegue de una infraestructura de carga efectiva.

En cuanto a los **FCH-HDT**, este tipo de vehículos han comenzado ya a realizar pruebas de demostración real en carretera. Sin embargo, todavía queda mucho para conseguir que exista una solución de mercado comercializable y ensayada completamente en un entorno operacional, que garantice su fiabilidad. De este modo la producción de este tipo de vehículos todavía se encuentra en una fase muy temprana de desarrollo, implicando costes de vehículo y de la cadena de abastecimiento de H₂ relativamente altos. Adicionalmente, no cuentan aún con la infraestructura de recarga necesaria para comenzar un despliegue efectivo.

De un modo similar, los camiones de batería eléctrica (**BET**) tienen que hacer frente a importantes limitaciones relacionadas especialmente con las baterías, como son:

- Su peso, que limita su rango de actuación, así como la carga útil que pueden transportar
- Su coste, que frena su adquisición
- Su recarga, que tiene requerimientos concretos y limita su operatividad

Sin embargo, a diferencia de lo que ocurría con el hidrógeno, el desarrollo de camiones BEV se está viendo beneficiado por la experiencia adquirida en otros segmentos, como el de los vehículos utilitarios y de transporte ligero. Como resultado, este tipo de camiones está más establecido en entornos operacionales.

Por otro lado, los camiones propulsados por **combustibles bajos en carbono**, como por ejemplo el GNC o GNL, tienen un potencial más reducido en cuanto a la reducción de emisiones, partículas y otros contaminantes. Aun así, estos camiones han encontrado un mercado en Europa y se pueden ver en soluciones de transporte y logísticas como una alternativa al diésel. Dicho esto, este tipo de combustibles también se ve frenado por la inexistencia de una infraestructura de recarga sólida.

Dentro de este campo también se encuentra otra alternativa a los motores de combustión diésel, como son los **e-fuels**. Una alternativa libre de CO₂ con rangos de utilización de medios a altos. Varios proyectos sobre estos combustibles han demostrado su madurez tecnológica, pero la producción del propio combustible y la limitada cadena de suministro todavía se presentan como obstáculos insalvables para dar el salto a la comercialización a gran escala.

Los **camiones por catenaria** presentan una respuesta similar a la reducción de emisiones que los camiones BEV, siempre y cuando no exista motor de combustión auxiliar instalado. Pero además presentan la ventaja de que, al cargar mientras realizan su trayecto a través de la conexión a una red eléctrica, no requieren un tiempo de carga, y, por lo tanto, baterías tan pesadas, presentando así un alto rango de operación. Por el contrario, estos camiones son altamente dependientes del despliegue de una extensa red de recarga.

Por encima de todo, hay que tener en cuenta que el potencial de reducción de emisiones con cadenas de tracción alternativa depende de la fuente de energía que se use. Si la electricidad empleada para la carga del vehículo, o la energía utilizada para la producción del H₂ o del e-fuel no procede de fuentes renovables, estas alternativas no pueden ser tenidas en cuenta para una reducción completa de las emisiones de CO₂. Además, para el caso de los camiones e-fuel, al tratarse de camiones convencionales con un motor de combustión interna, también emiten NOx, y por lo tanto contribuyen a la emisión de contaminantes y partículas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo principal

El principal objetivo de este proyecto es el de analizar la viabilidad de utilizar vehículos propulsados por pila de combustible de hidrógeno en los servicios de emergencia de bomberos.

El trabajo persigue analizar las prestaciones del sistema tractor de un camión de bomberos con tracción eléctrica alimentado por una pila de combustible de hidrógeno, de modo que sea capaz de cumplir tanto las expectativas de tracción como las de operación exigibles a este tipo de vehículos, para poder prestar todos los servicios que tienen encomendados los cuerpos de bomberos.

Para ello se llevará a cabo una comparativa de las prestaciones que tienen los vehículos de bomberos actuales con motorización diésel con las de un vehículo de hidrógeno, teniendo en cuenta también todos los demás aspectos asociados al uso de esta tecnología, relacionados con el despliegue de este tipo de flotas de vehículos.

3.2. Objetivos secundarios

Además de conocer en qué grado se pueden llegar a cumplir las especificaciones necesarias de este tipo de vehículos mediante un camión pesado de pila de combustible, el proyecto cuenta con los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar los obstáculos específicos que deben vencer los fabricantes y carroceros para el desarrollo y comercialización de camiones de hidrógeno destinados a los servicios de extinción y prevención de incendios.
- Proporcionar a las administraciones los conocimientos básicos sobre el tipo de inversión y retos a los que deben hacer frente en caso de plantear la adquisición de vehículos de este tipo.
- Analizar el grado en el que un FC-HDT de bomberos permite reducir el impacto medioambiental respecto a su homólogo en motorización diésel
- Contribuir a la transición hacia una movilidad más limpia, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.
- Servir de proyecto guía para el desarrollo de otros estudios de I+D que busquen la utilización de vehículos FCH-HDT en otros sectores de actividad similares (camiones de basura, de limpieza, de reparto local).
- Contribuir a la innovación en el sector de las emergencias y a la modernización de los servicios de bomberos, anticipando el trabajo que será necesario hacer en el futuro ante la transición hacia una movilidad más sostenible.
- Acercar los vehículos de hidrógeno a la sociedad y especialmente al colectivo de bomberos.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Los vehículos de hidrógeno

De todas las tecnologías mencionadas, el presente proyecto va a ahondar en el diseño y prestaciones de la cadena de tracción de pila de combustible de H₂. A pesar de que esta tecnología todavía no ha llegado al segmento de los vehículos pesados, el mercado de los vehículos ligeros sí que cuenta con ciertas experiencias, que, aunque se limitan a unos pocos modelos y fabricantes concretos, está despertando el interés del sector y podría favorecer y acelerar el desarrollo de vehículos más pesados. La Tabla 2 muestra una relación de los vehículos de hidrógeno que se han desarrollado y comercializado en los últimos años¹:

Hyundai Nexo		Disponible en España
	Potencia	135 kW (184 CV)
	Aceleración	9,5 segundos
	Velocidad máxima	179 km/h
	Tiempo de recarga	5 minutos
	Autonomía	666 km
	Precio	72.850€
Toyota Mirai		Disponible en España
	Potencia	128 kW (182 CV) 300Nm
	Aceleración	9 segundos
	Velocidad máxima	175 km/h
	Tiempo de recarga	3 minutos
	Autonomía	500 km
	Precio	65.000 €
Honda Clarity Fuel Cell		Disponible en USA pero dejará de fabricarse
	Potencia	103 kW (174 CV) 300Nm
	Aceleración	- segundos
	Velocidad máxima	- km/h
	Tiempo de recarga	- minutos
	Autonomía	580 km
	Precio	55.000 €
Hupiun Machina		Producción comenzará el año que viene
	Potencia	368 kW (500 CV)
	Aceleración	- segundos
	Velocidad máxima	200 km/h
	Tiempo de recarga	3 minutos
	Autonomía	1.000 km
	Precio	120.000 €

Tabla 2: Listado de turismos comerciales de hidrógeno

Como cualquier otra tecnología incipiente, los costes de fabricación, y por tanto de adquisición todavía son muy elevados, pero los datos técnicos de los vehículos (con notorias prestaciones mecánicas y grandes autonomías) pueden favorecer un rápido despliegue, si el resto de factores (infraestructura, legislación y normativa, etc.) les acompañan.

¹ <https://movilidadelectrica.com/coches-de-hidrogeno-actuales-y-proximos/>

4.2. Experiencias previas con hidrógeno en camiones

Si bien dentro de los vehículos eléctricos existe una diferencia apreciable de madurez tecnológica entre vehículos ligeros y pesados, dentro de los de propulsión con pila de combustible de hidrógeno ese “gap tecnológico” no se da de forma tan acusada, puesto que ambas se encuentran todavía en una fase temprana.

A pesar de ello, se pueden encontrar ya varios fabricantes que han decidido apostar por esta forma de propulsión, habiendo llegado a desarrollar algún modelo semi-comercial:

Hyundai XCIENT Fuel Cell	Presentado en 2019: flota de 46 uds., distribuidos en 25 empresas suizas.	
Combustible	2 pilas de 90 kW (180 kW)	
Motor	Eléctrico. 350 kW / 2.237 Nm	
Depósito	7 depósitos de 31 kg de H ₂	
Baterías	3 baterías, con 72 kWh en total	
Autonomía	400 km	
Volvo Trucks	En fase de pruebas	
Combustible	2 pilas de 150 kW (300 kW)	
Autonomía	1.000 km	
Mercedes-Benz GenH2	Presentado en 2020. Ahora en fase de pruebas (en carretera) y desarrollo	
Motor	Eléctricos 2 x 230 (330) kW, 312 (448) CV 2.071 Nm.	
Depósito	2 tanques de 40 kg de H ₂	
Autonomía	1.000 km	
DAF	Presentado en 2021. En demostración	
Potencia	560 HP	
Velocidad máxima	65 mph	
Autonomía	150 millas	
Baterías	100 kW	
Toyota Hino	-	
Baterías	Dos baterías idénticas a las del nuevo Toyota Mirai	
Depósito	700 bar	
Autonomía	600 km	
Renault Maxity	Proyecto de I+D finalizado	
Motor	Eléctrico asíncrono 400 V / 47 kW / 270 Nm	
Depósito	2 x 4kg de H ₂ a 350 bar	
Velocidad máxima	90 km/h	
Combustible	Pila de 20 kW	
Autonomía	200 km	
Baterías	42 kWh (4 baterías de 400 kg total)	

Tabla 3: Listado de camiones comerciales / prototipos de hidrógeno

4.3. Tipos de vehículos usados actualmente por los servicios de bomberos

Los servicios de bomberos cuentan con una amplia variedad de vehículos, con finalidades muy diferentes, que les permiten poder cubrir los distintos tipos de servicios que pueda requerir la ciudadanía. Por ello, en el Congreso de Bomberos celebrado en Zaragoza en el año 1.985 se decidió unificar los criterios de clasificación de los vehículos para mejorar la operatividad entre servicios.

Cada servicio de bomberos tiene unas características propias que derivan de los riesgos que vaya a poder atender en su zona geográfica de actuación. Sin embargo, en la práctica totalidad de servicios vamos a poder encontrar los siguientes vehículos:

Medios ligeros: Se trata de turismos (Todo terrenos, furgonetas y utilitarios), con una motorización diésel, de entorno a los 100 CV de potencia, que permiten dar una mayor flexibilidad a los servicios al poder actuar de forma rápida y proveer de material adicional a los camiones en caso de que se necesite material muy específico. Por otro lado

- Vehículos de Intervención Rápida (VIR)
- Unidades de Transporte de Personal y Carga (UTP)
- Unidades de Mando de Parque y de Jefatura (UMP, UMJ)
- Vehículos específicos
 - Furgón de Rescate Acuático (FEA)
 - Furgón de Útiles Varios (FUV)
 - Unidad de drones (UAS)

Medios pesados: Se trata de camiones que cuentan con motorizaciones diésel, con potencias que pueden ir desde los 150 hasta los 500 CV, rondando comúnmente los 300-350 CV. Van a ser la principal herramienta en el trabajo de los bomberos, ya que su misión es la de transportar agua y una gran cantidad de materiales para hacer frente a múltiples tipos de emergencias. También existen vehículos especiales para intervenciones en altura y otros servicios auxiliares.

- Bombas Urbanas Pesadas (BUP) y Ligeras (BUL)
- Bombas Rurales /Forestales Pesadas (BRP/BFP) y ligeras (BRL/BFL)
- Bombas Nodrizas Pesadas (BNP) y Ligeras (BNL)
- Autobrazos Automáticos (ABA) y Autoescalas Automáticas (AEA)
- Quitanieves
- Grúas (AGP)

Embarcaciones:

- Embarcaciones a motor (ligeras / pesadas)
- Embarcaciones sin motor (rafts, kayaks)

Medios aéreos:

- Helicópteros
- Aviones de extinción

4.4. Caso de estudio

De todos los medios de transporte con los que cuentan los SPEIs, el presente proyecto se va a centrar en los medios terrestres, y concretamente en los vehículos pesados, analizando la viabilidad de incorporar a la flota de vehículos un camión impulsado por pila de hidrógeno.

Para poder obtener unos resultados lo más próximos a la realidad posibles, el diseño de la nueva cadena de tracción se va a comparar con un camión de bomberos real, que se muestra en la Figura 12. Este camión perteneciente al Servicio de Prevención y Extinción de Incendios de la Diputación Provincial de Zaragoza, y está ubicado en el Parque de Bomberos de Calatayud.



Figura 13: Bomba Urbana Pesada objeto de estudio

Se trata de una Bomba Urbana Pesada (BUP), un vehículo “Primera salida” como se conoce comúnmente, dado que es el vehículo que se utiliza para la mayoría de intervenciones por la versatilidad de su equipamiento y prestaciones. Este camión es de la marca Iveco, modelo Eurocargo 150 e30. A continuación se detallan sus características principales:

Cabina	Doble y abatible
Bastidor	2 ejes
Cilindrada [cm3]	5.880
Potencia [CV]	220
Pistones	6 en línea
Combustible	Diésel
Capacidad del tanque de combustible [Litros]	200
Depósito de Urea [Litros]	25
Capacidad aceite motor [Litros]	11,6
Normativa de gases a cumplir	Euro 5
Cisterna [litros]	3.500
Altura [mm]	3.225
Anchura [mm]	2.550
Longitud [mm]	7.545
Distancia entre ejes [mm]	4.185
Tara [kg]	4.785
Masa Máxima Admisible (MMA) [kg]	15.000
Peso actual [kg]	13.400

Tabla 4: Especificaciones técnicas de la BUP objeto de estudio

4.5. Vehículos de bomberos eléctricos: primeras experiencias

Los servicios de bomberos, tal y como ocurre con otros servicios de urgencia como los sanitarios o de seguridad, tienen que actuar en **situaciones donde prima la rapidez y eficacia**, por lo que todos los medios que estos cuerpos utilizan deben poder garantizar unos estrictos valores de fiabilidad. Por este motivo, si bien este tipo de servicios va paulatinamente incorporando distintas innovaciones a sus medios técnicos, lo hace a un ritmo bajo, cuando todo ha sido ampliamente probado y validado, tanto en términos de fiabilidad como de operatividad.

Esto mismo ocurre cuando hablamos de la flota de vehículos. A día de hoy se están empezando a llevar a cabo algunas experiencias con vehículos eléctricos. Desafortunadamente, la categoría de vehículos pesados eléctricos todavía se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. De este modo, aunque existen ya unas pocas soluciones probadas por fabricantes de gran prestigio como Volvo, Scania o DAF, las empresas que carrozan los vehículos de bomberos todavía no se han lanzado a utilizar estos modelos por diversas razones.

Primer camión de bomberos eléctrico

En Europa, el carrocero austriaco Rosenbauer ha sido el primero en desarrollar un vehículo de bomberos completamente eléctrico, empleando como base el Volvo FL Electric. El modelo Rosenbauer RT (Revolutionary Technology) se presentó en otoño 2020, y tiene **dos motores eléctricos**, uno por cada eje, que, en conjunto, desarrollan hasta 360 kW (490 CV) de potencia y 50.000 Nm de par.



Figura 14: Camión eléctrico de bomberos. Rosenbauer RT

Sus baterías de 132 kWh le proporcionan una autonomía de unas 2 horas y además de surtir de energía a los propulsores, alimentan las tomas de corriente que equipa para enchufar dispositivos externos. La potencia de recarga le permite pasar del 50 al 80 % en sólo 15 minutos. Además, puede portar entre los 1.800 y 2.800 litros de agua, cantidades similares (aunque ligeramente inferiores) a los vehículos actuales del mismo tipo.

Sin embargo, el Rosenbauer RT 4x4 también incorpora un motor diésel de 200 kW de potencia que juega el papel de extensor de autonomía (concediéndole 300km adicionales), para el caso de necesidades extremas o intervenciones que se prolonguen en el tiempo.

Este modelo se está empezando a probar en cuerpos de bomberos de distintas partes del mundo, como la Comunidad de Madrid o las ciudades de Berlín y Los Ángeles. No obstante, existe una limitación importante, que radica en su elevado coste: supera los 1,2 m€, cuando un vehículo convencional de la misma categoría puede situarse entre los 300.000-350.000 €.

4.6. Experiencias previas con hidrógeno en vehículos de bomberos

Dado que los camiones propulsados por pila de hidrógeno todavía están de forma generalizada en una fase muy temprana de desarrollo, su aplicación en el sector de las emergencias es nula.

A pesar de que algunos carroceros, como Ziegler, han manifestado su interés por esta tecnología, tan sólo existe un proyecto, a nivel experimental, de la **utilización de hidrógeno como combustible para estos vehículos**. Se trata del proyecto HySPERT, una iniciativa financiada por el gobierno británico a través del programa “Transition to Zero Emission” para diseñar una cadena de tracción con pila de combustible de hidrógeno para vehículos pesados, como los camiones de bomberos.

HySPERT (HYdrogen Special Purpose Electric vehicle platform for Refuse collection and fire Trucks), está coordinado por la empresa ULEMCo, especializada en la conversión de vehículos comerciales a la propulsión por hidrógeno y cuenta con la colaboración del Consejo del Condado de Oxfordshire y su Servicio de Incendios y Rescate.

HySPERT proporcionará un diseño de ingeniería detallado que sentará las bases para el diseño de un prototipo, elaborando un plan para el repostaje que explore su integración en los planes del gobierno británico para el desarrollo de una infraestructura de carga por todo el país.

5. Estudio

5.1. Diseño

5.1.1. Normativa para el diseño de vehículos de extinción de incendios

En el momento en que se fabricó el camión objeto de estudio (año 2012), coexistían en nuestro país una serie de normas nacionales y europeas que regulaban las características que deben reunir los vehículos de los servicios de extinción de incendios y salvamento / servicios auxiliares. Sin embargo, a mediados de 2022 las normas nacionales (UNE 23900 a UNE 23905) han sido derogadas, y tan solo han quedado con vigencia las normas europeas.

De todas las normas que existen actualmente, el objeto de este proyecto se ha de regir por la *UNE-EN 1846-1:2011 Vehículos contra incendios y de servicios auxiliares*, que consta de tres partes. En ellas se regula tanto los vehículos de extinción de incendios como los de otro tipo de servicios. Su misión es proporcionar una serie de recomendaciones generales para cualquier tipo de vehículo contenido en su ámbito de aplicación.

A pesar de la existencia de estas normas, en España ninguna de ellas es de obligado cumplimiento, ya que no existe una norma de rango superior o una ley / decreto que determine que el diseño y fabricación de los vehículos de bomberos ha de llevarse a cabo de acuerdo a lo estipulado en ellas. Por este motivo, los vehículos de emergencias que se encuentran en los distintos servicios de bomberos pueden variar mucho de unos casos a otros.

La norma no es muy explícita en cuanto a los requisitos técnicos necesarios, pero se van a recopilar una serie de datos que servirán para el diseño base de la nueva cadena de tracción.

Autonomía

Se establece que la capacidad del depósito de combustible debe permitir el cumplimiento de la condición más exigente de las dos siguientes:

- Trayecto de 300 km por carretera
- Funcionamiento durante 4 h del equipo instalado permanentemente, en las condiciones normales de utilización, si el dispositivo está dotado de equipo accionado por el motor del vehículo.

Prestaciones dinámicas

Para conocer las prestaciones que el vehículo debería cumplir, es preciso identificar la categoría en la que el camión queda clasificado por la norma, de acuerdo a dos parámetros.

Su masa total en carga (MTC)		Su uso (capacidad de paso)	
Ligeros (L)	$3 < \text{MTC} \leq 7,5 \text{ T}$	Categoría 1	Urbano
Medios (M)	$7,5 < \text{MTC} \leq 16 \text{ T}$	Categoría 2	Rural
Superior (S)	$> 16 \text{ T}$	Categoría 3	Todo terreno

El camión seleccionado para el estudio está destinado al ámbito urbano y cuenta con una MTC de 15.000 kg. Por ello la designación que le corresponde de acuerdo a la UNE 1846 sería M-1. A esta categoría le serán exigibles las siguientes prestaciones dinámicas:

- Aceleración en 100m desde parado: Menor o igual a 15 segundos
- Aceleración a 65 km/h desde parado: Menor o igual a 17 segundos
- Velocidad mínima: Mayor o igual a 90 km/h
- Capacidad ascensional: No tiene exigencia
- Autonomía: Trayecto de 300 km por carretera o funcionamiento durante 4 h del equipo instalado permanentemente

5.1.2. Elementos específicos de la tracción mediante motor diésel

En un motor diésel se aprovecha la energía que libera el gasoil tras su combustión para producir el movimiento del vehículo. El combustible, almacenado en un depósito, se envía al interior del motor mediante un sistema de bombeo que está impulsado por el propio motor, concretamente a unos cilindros donde llega gracias a la acción de unos inyectores. En dichos cilindros el diésel se mezcla con el oxígeno del aire y entra en combustión debido al incremento de la presión y temperatura producido por un pistón.

La combustión produce, por un lado, un movimiento sobre el pistón, que se traslada a las ruedas a través de un mecanismo de tracción, haciendo así moverse al vehículo. Por otro lado, la combustión genera una serie de gases que son expulsados a la atmósfera a través un sistema de canalización y purificación. Debido a las altas temperaturas y a la fricción entre elementos, el sistema requiere del uso de líquido refrigerante, así como de aceite lubricante respectivamente, con sendos instrumentos para el control de temperatura, impulso y calidad.

En la Tabla 6 se ha elaborado un listado de los elementos que se podrían retirar del sistema de motorización diésel con el que cuenta el BUP en estudio, para ser reemplazados por los componentes de la futura cadena de tracción de hidrógeno. Esto permitirá saber el peso y volumen que se gana o pierde al reemplazar un sistema por otro.

Dado que en el trabajo se va a examinar el funcionamiento del camión a lo largo del ciclo de vida, es preciso definir su funcionamiento durante el tiempo que esté operativo.

El camión objeto de estudio entró en servicio en el año 2012 y como punto de partida se van a utilizar los datos registrados hasta noviembre de 2021. Estos datos están registrados en la Tabla 5, y se utilizarán para cálculos posteriores como los costes de mantenimiento, gasto en combustible, etc. extrapolándolos al tiempo de vida útil como camión de bomberos dentro del propio servicio. Es decir, no se tendrá en cuenta el siguiente uso que se le dará.

Periodo registrado	-	Noviembre/2012 – Noviembre/2021
Tiempo en funcionamiento (años)	Años	9
Tiempo en funcionamiento	Horas	3.612,8
Tiempo de trabajo bomba	Horas	610
Tiempo trabajado al ralentí	-	20%
Tiempo total trabajado al ralentí	Horas	772,6
Distancia recorrida	km	44.564
Extrapolación a la vida útil del camión		
Tiempo de vida	Años	15
Distancia recorrida	Km	74.273
Tiempo de trabajo	Horas	6.021,3
Tiempo de trabajo al ralentí	Horas	1.204,3

Tabla 5: Datos de partida del camión de bomberos

Los vehículos destinados a este tipo de servicios trabajan durante gran parte de su vida al régimen de ralentí. Por este motivo ese tiempo debe ser tenido en cuenta para el cálculo de diversas cuestiones como los mantenimientos periódicos o las emisiones contaminantes.

Para determinar el valor de ese tiempo, se ha relacionado el tiempo total de trabajo y el tiempo de trabajo de la bomba (que puede estar cercano a dicho régimen en muchas ocasiones). Esta cifra (17%) se ha sobredimensionado ligeramente hasta alcanzar el valor del 20% ya que también va a existir un tiempo de trabajo al ralentí sin que la bomba del camión esté conectada (por ejemplo, tras un incendio o durante las revisiones diarias).

ELEMENTO	Uds.	PESO UD. (kg)	VOL. UD. (litros)	PESO TOT. (kg)	VOL. TOT. (litros)
Sistema de propulsión					
Motor	1	470,00	3.281,25	470,00	3.281,25
Motor de arranque	1	8,80	0,5	8,80	0,50
Tubo de admisión	1	1,50	15,39	1,50	15,39
Colector admisión	1	3,00	7,5	3,00	7,50
Filtro de aire y caja	1	10,00	13,35	10,00	13,35
Turbocompresor	1	27,00	23,76	27,00	2.505,00
Sistema almacenamiento y canalización del combustible					
Bomba de combustible	1	7	0,25	7	0,25
Válvula reguladora de caudal	1	0,5	0,125	0,5	0,13
Depósito de combustible	1	35	219,38	35	219,38
Filtro de combustible (y soporte)	1	0,26	2,36	0,26	2,36
Canalizaciones de combustible	3	0,1	-	0,3	-
Sistema de control					
EDC (Electronic Diésel Control)	1	1	1,8	1	1,80
Pedal y cilindro de embrague	1	0,5	1	0,5	1,00
Servoembrague	1	3,8	0,96	3,8	0,96
Líquido de embrague	1	1,2	1	1,2	1,00
Canalización líquido embrague	-	-	-	-	-
Embrague (maza y disco)	1	26	7,536	26	7,54
Caja de cambios	1	60	250	60	250,00
Bomba de dirección	1	3,39	0,0625	3,39	0,06
Compresor neumático	1	6	31,25	6	
Sistema de refrigeración					
Radiador	1	3,2	8,91	3,2	8,91
Depósito líquido refrigerante	1	6,25	8,4	6,25	8,40
Bomba de líquido refrigerante	1	0,7	1,5	0,7	1,50
Tubos líquido refrigerante	3	0,2	-	0,6	-
Sonda de temperatura	-	-	-	-	-
Testigo de temperatura	1	-	-	-	-
Ventilador	1	5	100,48	5	100,48
Sistema de control de emisiones					
Colector escape	1	3,00	7,5	3,00	7,50
Tubo de escape	2,5	3,00	38,47	7,50	96,16
Silenciador	1	43,00	192,89	43,00	192,89
Catalizador	1	55	109,20	55	109,20
Filtro antipartículas (dentro catalizador)	1	14	-	14	-
Depósito de AdBlue (con bomba)	1	7	39,60	7	39,60
Unidad de control AdBlue	1	-	-	-	-
Testigo e indicador nivel AdBlue	1	-	-	-	-
Canalizaciones adblue	3	0,5	-	1,5	-
Sistema de lubricación					
Cubre cárter	1	10	7	10	7,00
Filtro de aceite	1	0,34	1,96	0,34	1,96
Testigo de nivel de aceite	1	-	-	-	-
Sistemas auxiliares					
Baterías 24V	2	36	20,85	72	41,69
Alternador	1	7,5	21	7,5	21,00
Palanca de cambio	1	1	-	1	-
PESO TOTAL (kg)					902,84

Tabla 6: Listado de elementos propios de una cadena de tracción de gasoil

5.1.3. Elementos específicos de la tracción mediante pila de hidrógeno

En un vehículo con propulsión mediante pila de hidrógeno (FCEV por sus siglas en inglés - Fuel Cell Electric Vehicle), el elemento propulsor es un motor eléctrico, que puede ser alimentado bien por una batería o por una célula de combustible, y que utilizan como combustible hidrógeno almacenado a presión en un tanque.

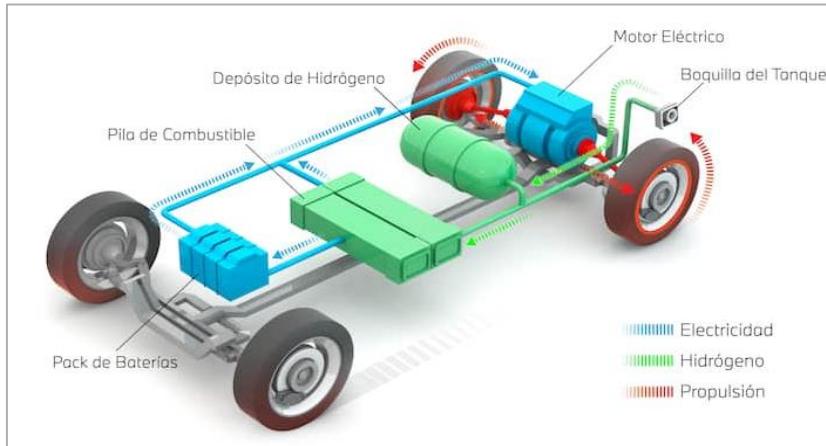


Tabla 7: Elementos principales de una motorización con pila de hidrógeno

Los FCEV poseen una diferencia fundamental respecto a los vehículos eléctricos, y es que la electricidad no procede de una batería integrada que puede recargarse desde una fuente externa, sino que es **producida por el propio sistema**. Es decir, los vehículos de hidrógeno llevan a bordo su propia “central eléctrica” en forma de pila / célula de combustible.

De este modo, la célula de combustible es el elemento en el que se produce la reacción química que genera la electricidad necesaria para el motor. Este fenómeno se denomina **electrólisis inversa**, y utiliza para ello hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno proviene de uno o varios depósitos alojados en la carrocería, mientras que el oxígeno se capta del aire ambiental. Lo único que se deriva de esta reacción es la energía eléctrica generada, calor y agua, que se expulsa a la atmósfera en forma de vapor por el sistema de escape. Por eso el coche de hidrógeno no genera emisiones nocivas a nivel local.

La energía que se genera en las celdas de combustible de hidrógeno recorre dos trayectos, en función de la demanda de la situación de conducción específica: puede fluir hacia el motor y accionar el vehículo directamente o puede cargar una batería, que se utiliza como almacén intermedio de la energía hasta que esta se necesite para accionar el motor. Esta batería, conocida como “de tracción”, es mucho más pequeña y ligera que la de los coches totalmente eléctricos, ya que se recarga constantemente desde la pila de combustible.

Como ocurre con otros coches eléctricos, los vehículos de hidrógeno pueden «recuperar» energía de frenado. Para ello, el motor eléctrico transforma la energía cinética del coche en energía eléctrica y alimenta a la batería de almacenamiento. En este caso también existe una unidad de control que regula la energía producida por la pila, así como la gestión de la demanda y carga de la batería, entre otros.

A continuación, se ha elaborado una tabla con los elementos específicos de la cadena de tracción de hidrógeno, para poder ser instalados en el chasis y la carrocería del camión de motorización diésel que se está utilizando como base.

ELEMENTO	UDS.	PESO UD. (Kg)	VOL. UD. (L)	PESO TOT. (Kg)	VOL. TOT. (L)
Sistema de propulsión					
Motor eléctrico	1	147	65,98	147	65,982
Pila de combustible	1	240	437,360	240	437,360
Sistema almacenamiento y canalización del combustible					
Tanque de hidrógeno	6	101,00	138,5417	606	1108,334
Canalización tanque-pila	3	0,1	-	0,3	-
Sistema de control					
Baterías	2,00	295,00	198,885	590	397,770
Centralita	1,00	42,00	58,269	42	58,269
Convertidor DC/DC	1	3	0,17226	3	0,172
Sistema de refrigeración					
Ventilador (dissipación calor)	1	5	100,48	5	100,48
Sistema de control de emisiones					
Tubo de escape	2,5	3,00	38,47	7,50	96,16
Sistemas auxiliares					
Bomba dirección (eléctrico)	1	10	7,92	10,00	7,92
TOTAL					1.650,80

Tabla 8: Listado de elementos propios de una cadena de tracción de hidrógeno

5.1.3.1. Diseño inicial de la cadena de tracción

Para poder realizar el estudio comparativo se va a hacer un diseño preliminar del camión de bomberos propulsado por hidrógeno. Este modelo teórico será el que se compare con el camión actual de motorización diésel. La elección de estos componentes se ha basado en las investigaciones llevadas a cabo en distintos informes, y experiencias piloto similares.

ELEMENTO	CRITERIO DE DISEÑO	ELEMENTO COMERCIAL
Motor eléctrico	Se parte de un modelo comercial de motor de aplicación a vehículos pesados como autobuses y camiones del que se dispone información técnica	1 x 140 kW
Pila de combustible	Potencia habitual: 32% - 55% de la potencia del motor. Para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de la pila a lo largo de su ciclo de vida se tendrán en cuenta los siguientes factores: <ul style="list-style-type: none">▪ Margen de seguridad: 2▪ Degradación de la capacidad de la pila: 10% El resultado es una potencia de pila necesaria de 67,2 kW .	1 x 70 kW
Baterías	Capacidad habitual: 30% de la potencia del motor eléctrico. Potencial habitual: El doble del valor de la energía que acumula. Factores adicionales de diseño: <ul style="list-style-type: none">▪ Degradación anual: 1%▪ Tiempo de vida útil: 10 años▪ SOC máximo del 90%. Estos valores proporcionan un factor total de sobre-dimensionamiento de 1,30. El resultado es una capacidad necesaria de 63,61 kW .	2 x 35 kW 56/112 kWh
Tanques de hidrógeno	Autonomía necesaria: 300 km (UNE-EN 1833) Consumo estimado de H ₂ : 0,07kg/km para vehículos pesados Capacidad gravimétrica del combustible: 5,5%. Presión de almacenamiento: 350 bar El resultado es una reserva de hidrógeno de 42 kg .	6 x 7,5kg H ₂

Tabla 9: Diseño de los componentes de la cadena de tracción inicial de hidrógeno

5.2. Criterios de análisis

5.2.1. Técnico-Operativo: Especificaciones dinámicas

En primer lugar, se va a realizar una comparativa de las prestaciones dinámicas entre el camión propulsado por gasoil y el propulsado por el hidrógeno. El objetivo es estudiar si un camión con sistema de hidrógeno puede tener un comportamiento, tanto en carretera como en una intervención, similar al diésel, o en qué grado podría llegar a cumplir dichas exigencias.

Para ello se van a plantear **cuatro casos prácticos**. Cada uno de ellos se corresponde con un escenario donde ha tenido lugar o puede tener lugar una intervención real. Con estos escenarios se pretende abarcar distintos grados de complejidad, para garantizar que el camión de hidrógeno pueda cumplir su función en cualquier situación.

5.2.1.1. Metodología de toma de datos

Registro digital y tratamiento de datos

La toma de datos se llevó a cabo utilizando un dispositivo de telefonía móvil con GPS, mediante el uso de la aplicación Wikiloc, que permite el registro de rutas con diversos parámetros.

Junto al track (coordenadas), la aplicación permite obtener información de la velocidad con la que se desplaza el dispositivo y la altura a la que este se encuentra cada segundo durante el tiempo que dura la grabación.

Estos datos, exportados en un fichero ".gpx", tuvieron que ser posteriormente tratados para poder realizar su representación y análisis. Para ello se utilizó la herramienta Excel, que también sirvió para hacer un filtrado de los mismos, con el fin de corregir errores durante la medición. Además, los ficheros generados no mostraban la distancia recorrida, si no que disponían, para cada instante, de las coordenadas de posición. De este modo fue necesario calcular la distancia entre dos puntos utilizando la Fórmula del Haversine, que permite calcular la distancia existente entre dos puntos de La Tierra teniendo en cuenta la curvatura del planeta.

La validación de las lecturas se llevó a cabo por doble vía. Por un lado, se utilizaron dos dispositivos diferentes para recoger una misma ruta, utilizando además aplicaciones distintas (POLAR FLOW, además de WIKILOC). Dado que en el primer caso no se registraban datos de altitud, se realizó la comparación de los registros de velocidades:

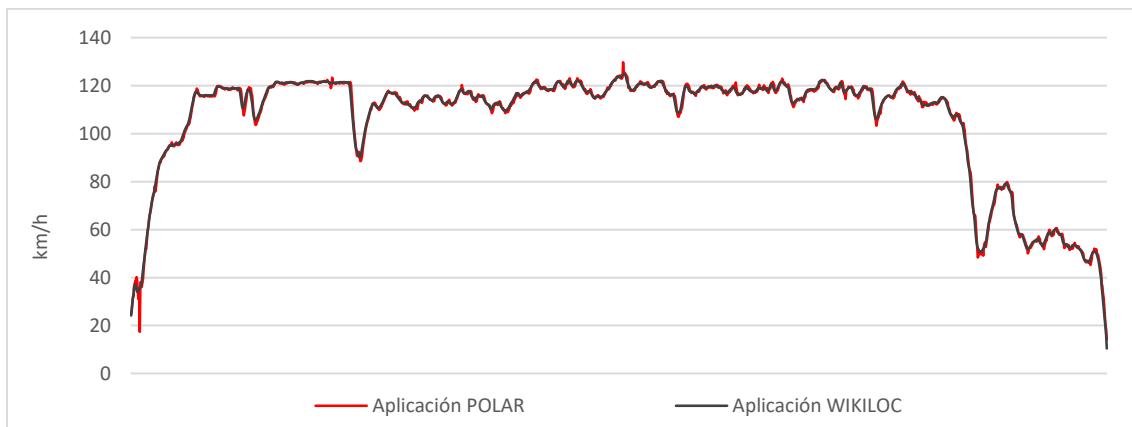


Figura 15: Validación de los datos de velocidad con distintas aplicaciones

Se observa que WIKILOC, para el trayecto realizado, presentó menos datos erráticos. Pero en términos generales ambas aplicaciones registraron valores similares.

Por otro lado, y para los registros de altitud, se utilizó la web del Instituto Nacional Geográfico, que ofrece la opción de obtener el perfil longitudinal de una ruta determinada que se dibuja en un mapa. Así se pudo comparar con las recogidas por el GPS y comprobar que estas se habían grabado de forma correcta, salvo algunos errores puntuales.

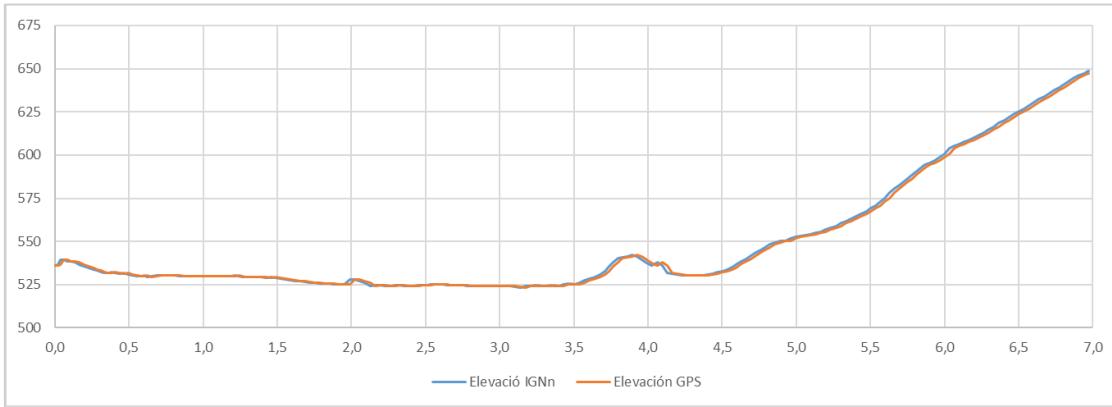


Figura 16: Validación de las mediciones de altitud con los datos del IGN

Una vez validado el procedimiento para la recopilación de los datos de las distintas rutas, fue preciso corregir las desviaciones más importantes, que se observaron principalmente en los campos de la velocidad y la altura. Así, se consideraron errores de lecturas aquellos donde la diferencia entre dos velocidades consecutivas era superior al 5%, y la de elevación al 8%, siempre que estos se presentaran de forma aislada.

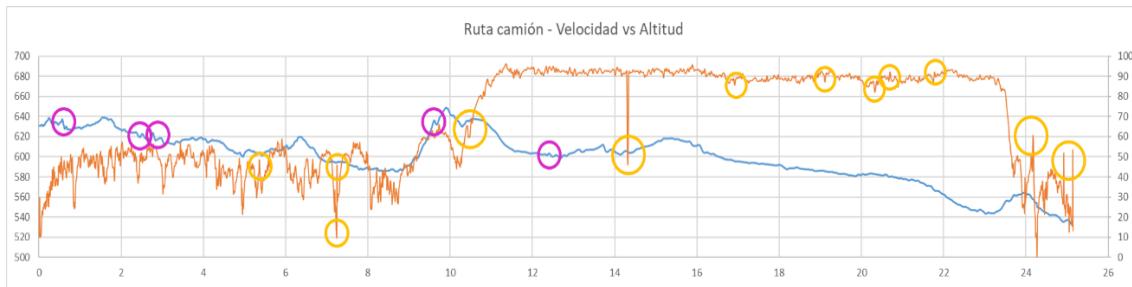


Figura 17: Ejemplo de depuración de datos erróneos

Diseño de rutas

El proyecto va a analizar el comportamiento del camión de extinción de incendios en cuatro escenarios distintos, que van a ser representativos de diversas situaciones de exigencia, tanto para el vehículo en movimiento como detenido. Hay que tener en cuenta que, durante una intervención, salvo caso excepcional, **el vehículo de emergencias no se detiene**. Y en muchos casos, se encuentra trabajando con la Toma de Fuerza (TF) accionada para poder realizar diversas labores, entre ellas la impulsión de agua.

Cada ruta seleccionada se compone de tres partes. El motivo es que un futuro camión de hidrógeno deberá de tener la autonomía suficiente para desplazar a la dotación hasta el incidente, actuar para hacer frente a la emergencia, y devolver a la dotación a la base. Ello se debe a que actualmente no existe una infraestructura de carga de hidrógeno, y hasta que esa red sea efectiva, será necesario instalar un punto de abastecimiento en el propio parque de bomberos, como ya ocurre con los surtidores de gasoil en algunos servicios. Además, esto limitaría el riesgo de quedarse sin combustible cuando se produce una emergencia nocturna, fuera del horario de apertura de muchas estaciones de servicio.

De este modo las partes de las que se compondrá cada ruta serán:

- Ida: Recorrido desde el parque de bomberos hasta el lugar del siniestro
- Intervención: Tiempo que el camión se encuentra estacionado con el motor en marcha, pudiendo estar con la TF acoplada o no.
- Regreso: Recorrido desde el lugar del siniestro al parque de bomberos.

Las rutas aparecen en la tabla XX ordenadas por su grado de complejidad, que se ha definido en base a varios parámetros (distancia, duración de la intervención, desnivel positivo, etc).

Ruta 1



Nivel de exigencia	Bajo
Tipo de intervención	Apertura de puerta en vivienda
Recorrido	Calatayud - Calatayud
Tipo de trayecto	Urbano
Distancia total (km)	4,837
Trabajo bomba (h)	0
Trabajo ralentí (h)	0,5

Ruta 2



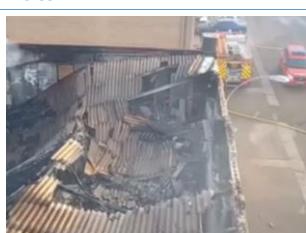
Nivel de exigencia	Bajo – Medio
Tipo de intervención	Incendio de cocina en restaurante
Recorrido	Calatayud – Carretera N-II
Tipo de trayecto	Mixto urbano – carretera rápida
Distancia total (km)	17,334
Trabajo bomba (h)	0,75
Trabajo ralentí (h)	0,5

Ruta 3



Nivel de exigencia	Medio - Alto
Tipo de intervención	Incendio de varios vehículos
Recorrido	Calatayud - Carenas
Tipo de trayecto	Mixto autovía – carretera lenta
Distancia total (km)	49,348
Trabajo bomba (h)	1
Trabajo ralentí (h)	0,5

Ruta 4



Nivel de exigencia	Alto
Tipo de intervención	Incendio de nave en polígono industrial
Recorrido	Calatayud - Illueca
Tipo de trayecto	Mixto autovía – carretera rápida
Distancia total (km)	80,63
Trabajo bomba (h)	4
Trabajo ralentí (h)	0,5

Tabla 10: Listado de rutas seleccionadas

5.2.1.2. Metodología de cálculo

El cálculo y dimensionamiento de la nueva cadena de tracción va a estar basado en las necesidades energética a las que va a estar sometido el camión de bomberos durante su trabajo.

La recopilación de los datos de posición, velocidad y altura va a permitir realizar el balance de energía entre cada intervalo de tiempo. Aplicando al balance energético los rendimientos que tienen los distintos elementos de cada una de las cadenas de tracción se obtendrá la cantidad de energía real que necesita el camión para desplazarse.

Rendimiento	Diésel	Hidrógeno
Motor (combustión / eléctrico)	0,40	0,95
Transmisión motor-eje motriz	0,92	0,92
Diferencial eje motriz	0,95	0,95
Transmisión toma de fuerza	0,95	0,95
Pila de combustible	-	0,6

Tabla 11: Eficiencias de cada uno de los elementos que integran las cadenas de tracción

Con este dato, y conociendo la densidad energética de cada uno de los combustibles, se obtendrá la cantidad de combustible necesario, tanto en litros de gasolina como en kilogramos de hidrógeno.

Para la validación de estos cálculos, ya que se dispone de la distancia real recorrida, se estudiará el consumo medio obtenido, y se comparará con su consumo real (para el caso del camión de gasoil), y su consumo teórico (para el caso del camión de hidrógeno). V^2_{final}

Las fórmulas empleadas en el cálculo del balance energético serán las siguientes:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} m V_{final}^2 - \frac{1}{2} m V_{inicial}^2 \quad [J]$$

$$\Delta E_P = m g h_{final} - m g h_{inicial} \quad [J]$$

$$W_{rod} = m C_x g \Delta s \quad [J]$$

$$W_{aer} = \frac{1}{16} C_d A V^2 \quad [J]$$

ΔE_C = Variación de la energía cinética

ΔE_P = Variación de la energía potencial

W_{rod} = Pérdidas debidas a la fricción con el suelo

W_{aer} = Pérdidas debidas a la resistencia aerodinámica

V_{final} = Velocidad al final del tramo

$V_{inicial}$ = Velocidad al inicio del tramo

H_{final} = Altura al final del tramo

$H_{inicial}$ = Altura al inicio del tramo

C_x = Coeficiente de rozamiento con el asfalto (0,01)

C_d = Coeficiente aerodinámico del camión (0,55)

A = Área frontal del camión ($6,226m^2$)

g = aceleración de la gravedad

Para simplificar los cálculos se ha despreciado la fuerza del viento, así como las inercias aparecidas en las curvas.

El resultado de aplicar estas fórmulas a cada tramo es la cantidad de energía que necesita el camión para desplazarse entre dos puntos salvando una distancia y altura determinadas, manteniendo o variando la velocidad según las necesidades.

$$E_{necesaria} = \Delta E_C + \Delta E_P + W_{rod} + W_{aer} \quad [J]$$

En este punto es posible observar que en algunos casos $E_{necesaria} < 0$. Esto significa que existe un exceso de energía (el camión no necesita tanta o se tiene que desprender de parte de ella). Puede ocurrir, por ejemplo, cuando se encuentra descendiendo por una pendiente, o tiene que realizar una frenada. Aquí aparece la primera diferencia en el comportamiento de cada camión:

- **Hidrógeno:** El sistema de regeneración de la energía del camión va a permitir recuperar parte de ella. Se ha estimado un valor del 25% de acuerdo a observaciones realizadas en sistemas similares. Si aun así sigue habiendo exceso de energía, será necesaria disiparla mediante los frenos.

Si $E_{necesaria} < 0$:

$$E_{regenerada} = 25\% E_{necesaria}$$

$$E_{freno} = E_{necesaria} - E_{regenerada}$$

- **Diésel:** En este caso la energía no se puede aprovechar y se utiliza para mantener la inercia del camión o ser disipada mediante los sistemas de frenado del camión.

Si $E_{necesaria} < 0$:

$$E_{necesaria} = 0:$$

Los resultados conseguidos hasta el momento se han basado en el camión actual del cuerpo de bomberos, que cuenta con una masa de 14.350 kg. Tal y como se ha visto anteriormente, una primera aproximación a la cadena de propulsión de H₂ conlleva un aumento de peso de 949,96kg (un 1,06% extra). De este modo, se va a realizar una extrapolación de los datos aplicando esta variación de la masa, que afecta a la energía cinética, potencial y de rodadura.

$$M_{\text{camión } H_2} = M_{\text{camión } Diésel} * 1,06$$

En este punto, se conoce la cantidad de energía resultante del balance de energías, y se ha recalculado de acuerdo a la masa del camión de hidrógeno. En una situación ideal el combustible en cada caso podría aprovecharse completamente, transmitiendo a las ruedas el 100% de su contenido energético. Sin embargo, es preciso aplicar los rendimientos propios de cada cadena de tracción.

Estos rendimientos se han considerado de la siguiente manera:

Cadena de tracción Diésel	Rendimiento	Cadena tracción H ₂	Rendimiento
Motor de combustión	0,4	Motor eléctrico	0,95
Caja de cambios	0,92	Pila de combustible	0,6
Diferencial	0,95	Diferencial	0,95
Reductora TDF (solo aplicable activada)	0,95	Reductora TDF (solo aplicable activada)	0,95

Tabla 12: Eficiencias de los elementos de la cadena de tracción

$$E_{necesaria\ Diésel} = \frac{E_{necesaria}}{\eta_{cadena\ tracción\ Diésel}}$$

$$E_{necesaria\ H_2} = \frac{E_{necesaria}}{\eta_{cadena\ tracción\ H_2}}$$

Y finalmente quedaría hacer el sumatorio para cada conjunto de datos que comprenden la ruta. En el caso del hidrógeno, la recuperación de energía se destinará a recargar las baterías, reduciendo el consumo respecto al diésel.

$$E_{total\ necesaria\ Diésel} = \sum E_{necesaria\ Diésel}$$

$$E_{total\ necesaria\ H_2} = \sum E_{necesaria\ H_2} - \sum E_{regenerada}$$

Con este dato es posible calcular la demanda de combustible para cada ruta, al conocer la densidad energética de cada tipo de carburante.

$$Cantidad\ de\ combustible = \frac{E_{total\ necesaria}}{\rho_{combustible}}$$

Siendo $\rho_{combustible}$ la densidad energética (poder calorífico) de cada uno de los combustibles que se están utilizando:

- Diésel: 42.900 kJ/kg
- Hidrógeno: 120.000 kJ/kg

Y al conocer la distancia empleada en cada ruta, es posible llegar a un cálculo teórico del consumo realizado, y compararlo como sigue:

- Camión Diésel: Consumo registrado a lo largo de la vida del camión
- Camión Hidrógeno: Consumo teórico de diversos informes y estudios.

Trayecto		Diésel (l/100 km)	Hidrógeno (kg H ₂ / km)
Ruta 1	Ida	38,913	0,074
	Regreso	34,642	0,066
Ruta 2	Ida	35,736	0,077
	Regreso	21,649	0,036
Ruta 3	Ida	31,539	0,061
	Regreso	30,286	0,056
Ruta 4	Ida	35,755	0,080
	Regreso	27,915	0,062
Promedio	Ida	35,485	0,073
	Regreso	28,623	0,055
	Combinado	32,054	0,064
Teórico-práctico		42,250	0,070

Tabla 13: Consumos de carburante de las rutas

Los resultados obtenidos en los cálculos de las diferentes rutas son muy similares a los teórico-prácticos que se desprenden del seguimiento del camión diésel y de los datos aportados por diversos informes y experiencias en el caso del hidrógeno, consiguiendo así la validación de los datos calculados en cuanto al consumo de energía.

En el caso del diésel, la diferencia entre el calculado en el proyecto y el real (que es mayor), puede ser debida principalmente a que en el segundo caso está incluido el gasto de gasoil en las situaciones en las que el camión se encuentra detenido (durante las revisiones diarias, en las prácticas realizadas o durante las intervenciones).

Balance energético de las rutas

Una vez se tienen los datos de consumo energética para los trayectos de ida y vuelta, todavía quedaría calcular el consumo que se va a producir a lo largo de la intervención en el siniestro.

El camión permanece encendido en régimen de ralentí durante el tiempo que dura ésta. En algunos casos (cuando hace falta lanzar agua), se conecta la toma de fuerza para accionar la bomba. A mayor potencia demandada a la bomba se le requerirá mayor potencia al motor. Sin embargo, las presiones de agua a las que se suele trabajar no requieren de un incremento considerable de las r.p.m. del motor. Por este motivo y para simplificar los cálculos, se va a considerar que incluso durante el funcionamiento de la bomba, el motor funciona al ralentí.

Tras un estudio de diversos informes y datos proporcionados por fabricantes, se ha estimado que el consumo de gasoil para un camión de estas características se sitúa en 1,5 litros por hora trabajada.

La cantidad de energía necesaria durante la intervención se podrá averiguar de la siguiente manera:

$$E_{intervención} = 1,5 * t * \rho_{Diésel} * P_{c Diésel} \quad [J]$$

Donde tenemos que:

- 1,5: Consumo al ralentí [litros/hora]
- t: Tiempo que dura la intervención [horas]
- $\rho_{Diésel}$: Densidad del Diésel [850 kg/m3]
- $P_{c Diésel}$: Poder calorífico del Diésel [42.000 kJ/kg]

Para calcular la cantidad de hidrógeno equivalente que sería necesario utilizar en la misma intervención bastaría con aplicar las eficiencias correspondientes a la cadena de tracción del hidrógeno y su poder calorífico.

$$kg_{H_2} = \frac{E_{intervención}}{\eta_{TH_2} * P_{c H_2}}$$

Siendo:

- η_{TH_2} : Rendimiento cadena de tracción (transmisión, pila, motor eléctrico) [0,54]
- $P_{c H_2}$: Poder calorífico del Hidrógeno [42.000 kJ/kg]

Dimensionamiento y validación de la cadena de tracción de hidrógeno

Los trabajos de dimensionamiento de la cadena de tracción del camión de pila de combustible comienzan por la selección de un motor eléctrico que permita cubrir los servicios de un modo similar a como lo hace el motor de combustión.

El primer paso para ello consiste en averiguar la potencia y el par (torque) que demanda el motor del camión en cada momento, para lo que se utilizará para cada intervalo de tiempo registrado la fórmula:

$$P = \frac{E_{necesaria H_2}}{t} \quad [W]$$

$$T_{motor} = \frac{T_{rueda}}{\eta_T * R_T} \quad [Nm]$$

Siendo:

- P: Potencia que requiere el camión en ese instante [W]
- $E_{necesaria\ H_2}$: Energía que requiere el camión para moverse durante el intervalo t [J]
- t: Tiempo durante el que está desplazándose para ese consumo de energía [s]
- T_{motor} : Par exigido al motor en cada intervalo de tiempo [Nm]
- T_{rueda} : Par transmitido a la rueda en cada intervalo de tiempo [Nm]
- η_T : Es el rendimiento de la transmisión motor-rueda [92%]
- R_T : Es la relación de transmisión entre el motor y las ruedas, que suele encontrarse entre los valores 5 y 10 [7,5]

En aquellos casos donde $E_{necesaria\ H_2} < 0$, la potencia será 0, ya que el motor eléctrico no estará demandando energía si no que se estará aprovechando para recargar las baterías.

Con la gráfica de potencias necesarias es posible identificar varios parámetros que permitirán definir un tipo de motor eléctrico:

- Potencias máximas requeridas: Es posible que se necesite una potencia muy elevada en un momento muy puntual, pero que el resto del tiempo la potencia consumida sea moderada. En ese caso será preciso valorar si el nuevo camión puede sacrificar ciertos aspectos punta con el fin de que no se produzca un sobredimensionamiento el resto del tiempo.
- Distribución del rango de potencias: Agrupando las potencias obtenidas por grupos de valores es posible estudiar qué rango de potencias son los más utilizados y cuáles podrían considerarse valores puntuales (que coincidirá con los valores máximos).

El siguiente paso será encontrar un motor que nos permita conseguir un comportamiento dinámico similar, teniendo en cuenta (a) que una gran parte de los picos de potencia supuestamente exigidos probablemente se deban a errores de registro, y (b), que la cadena de tracción basada en el hidrógeno conllevará un incremento sustancial del peso cuanto más exigentes sean las prestaciones (mayor motor implica una mayor pila de combustible, pero sobre todo mayores baterías).

El motor estará alimentado directamente por la pila de combustible. En aquellos casos donde no sea suficiente para cubrir la potencia eléctrica que necesita, contará con los apoyos de las baterías.

$$\text{Si } P_{motor} > P_{pila}, \text{ entonces } P_{batería} = P_{motor} - P_{pila}$$

Pero las pilas tienen una potencia máxima, de modo que podrá darse el caso que:

$$P_{motor} > P_{pila} + P_{batería}, \text{ resultando en que } P_{motor} = P_{Nominal\ motor}$$

El motor se seleccionaría para que sea capaz de cubrir la demanda de energía y potencia necesarias en cada cada trayecto. Pero esto puede suponer un tamaño de motor eléctrico, y de toda la instrumentación asociada (baterías, pila, etc.) que resultaría en un incremento considerable del peso.

Por esta razón, se abre la puerta a que el motor cubra solamente una parte importante de la demanda de potencia.

Para su validación, se comprobará que el par que es capaz de generar dentro del rango de potencias que puede abarcar, se encuentra dentro de los valores de operación. En esta tarea se recupera la fórmula del par, a la que se llegará a través de las siguientes fórmulas:

$$T_{rueda} = F_{rueda\ camión} * r_{rueda\ camión} \quad [Nm]$$

$$F_{rueda\ camión} = \frac{F_{necesaria}}{N} \quad [N]$$

$$F_{necesaria} = \frac{P}{v} \quad [N]$$

- N: Número de ruedas del eje motriz
- P: Potencia que requiere el camión en ese instante [W]
- v: velocidad del camión [m/s]
- $r_{rueda\ camión}$: Radio de la rueda del camión teniendo en cuenta la deformación [m]

Una vez obtenido el T_{motor} , se calculará el régimen de revoluciones al que trabaja:

$$RPM_{motor} = RPM_{ruedas} * R_T$$

$$RPM_{ruedas} = \frac{W_{ruedas} * 60}{2\pi}$$

$$W_{ruedas} = \frac{v}{r_{rueda\ camión}}$$

- RPM_{motor} : Régimen de trabajo del motor para una potencia dada [r.p.m]
- RPM_{ruedas} : Régimen de giro de las ruedas para una velocidad dada [r.p.m]
- W_{ruedas} : Velocidad angular de las ruedas [rad s⁻¹]

Ahora, con los datos de potencia, revoluciones y par, es posible acceder a la gráfica de prestaciones del motor, y comprobar que esos puntos de trabajo se encuentran dentro del rango de operación.

En la Figura 17 se muestra un resumen del procedimiento seguido en la metodología de cálculo para la consecución de los objetivos planteados.

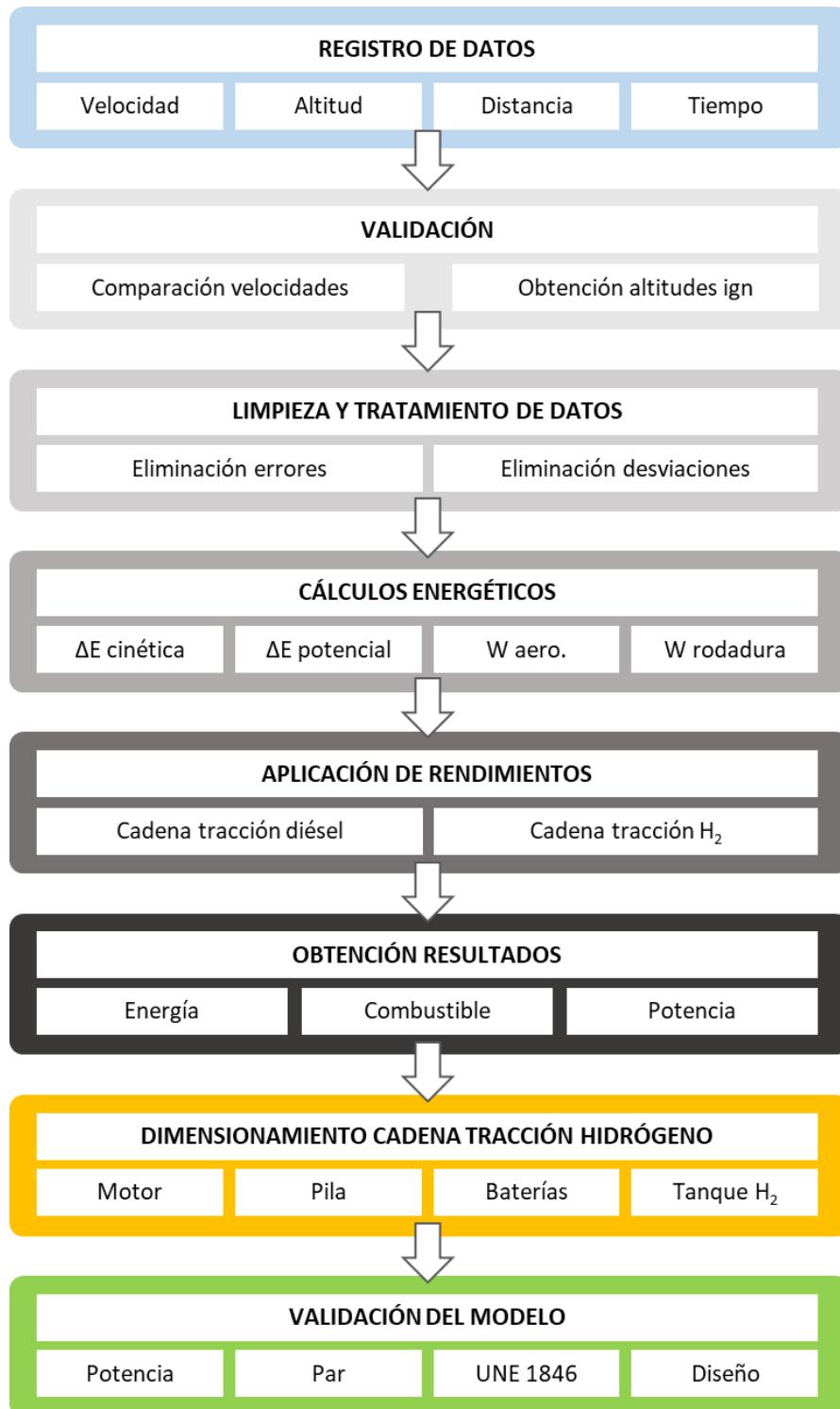


Figura 18: Procedimiento de la metodología de cálculo seguido

5.2.1.3. Resultados del análisis comparativo

Para cada ruta se hizo una representación del perfil de velocidades y la altura (Figura 18), con el objetivo de poder visualizarla de forma conjunta con el balance energético, de forma que ayudar a comprender el funcionamiento de las fuerzas implicadas en el cálculo y el comportamiento dinámico del camión. A continuación, se representaron para cada ruta y recorrido (ida y vuelta) las gráficas con todas las energías que participan en el modelo.

Para la Ruta 1, por ejemplo, donde apenas existía desnivel a lo largo del recorrido, se observa que la mayor parte de la energía necesaria se destina a cambiar la velocidad del camión.

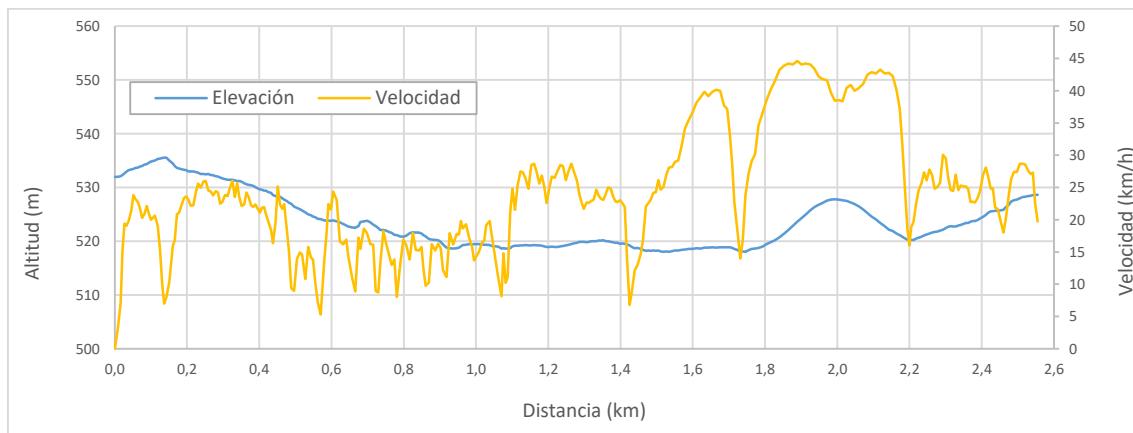


Figura 19: Perfil de velocidad y altitud de la ruta 1

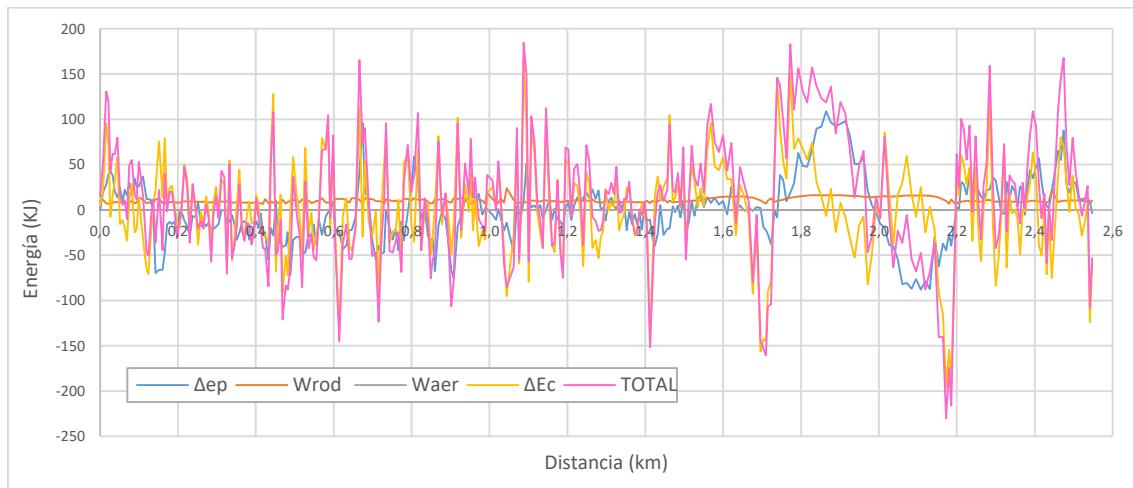


Figura 20: Balance energético de la ruta 1

Al comparar las gráficas de energía con sus respectivos perfiles de velocidad y altura, se aprecia que, a pesar del filtrado y limpieza de los datos recogidos por el GPS, siguen existiendo errores de medida que ocasionan un comportamiento erróneo en el balance energético.

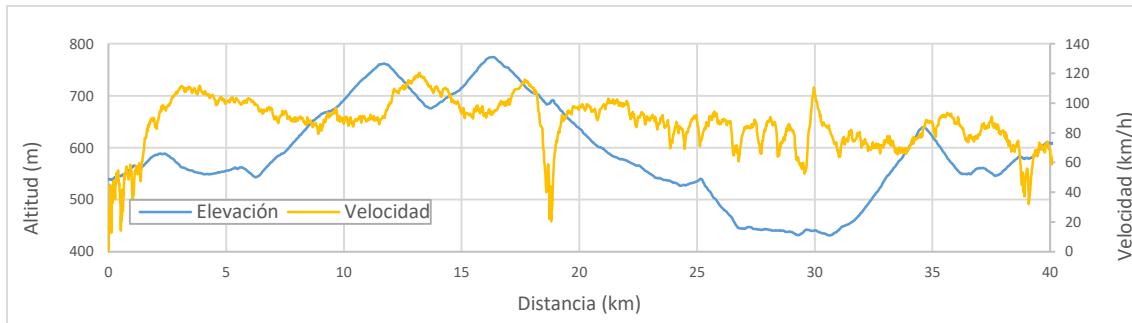


Figura 21: Perfil de velocidad y altitud de la ruta 1

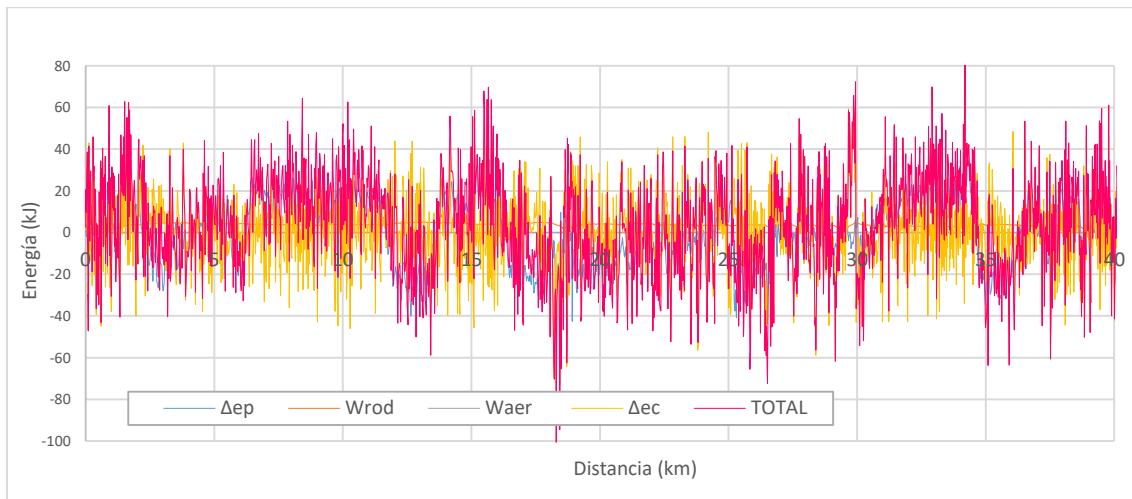


Figura 22: Balance energético de la ruta 1

La información conseguida de los consumos de energía, tanto para los trayectos de ida y vuelta, como para la intervención, permite conocer el balance energético total de cada una de las rutas, recopilado en la Figura 22. Como cabía de esperar, los trayectos de ida demandan más energía al realizarse en condiciones de emergencia, con mayor número de acelerones y una mayor velocidad punta. La gráfica muestra también que, salvo situaciones muy exigentes, el riesgo de quedarse sin combustible durante la intervención es muy limitado debido al reducido consumo que tiene el camión en ese régimen de funcionamiento.

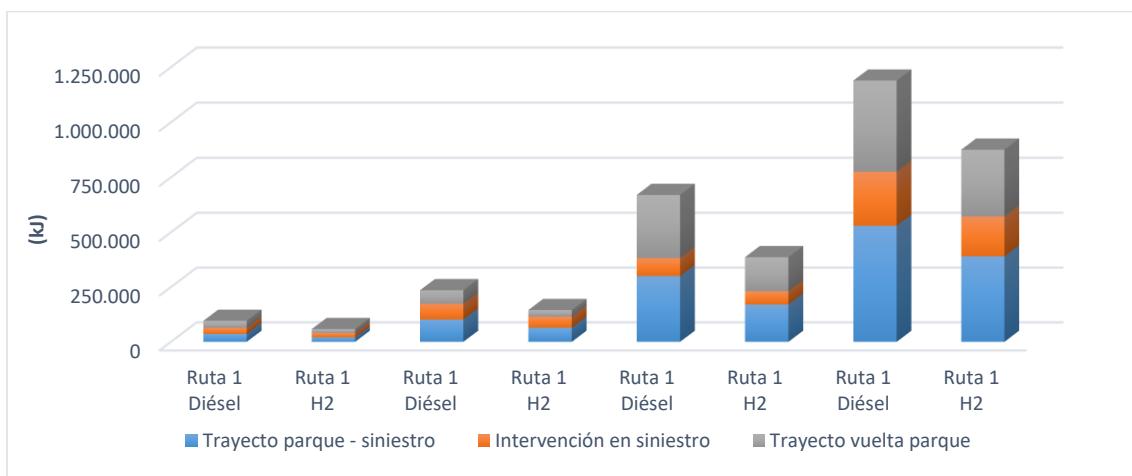


Figura 23: Comparación del consumo de energía de las cuatro rutas

El análisis de las potencias que se emplearon en cada una de las cuatro rutas arrojó los siguientes resultados, que se recogen en la Figura 23. En ella se aprecia que aparecen picos de potencia que pueden ser fruto de los errores de medición, y que están provocando un registro mayor del valor medio al que le correspondería.

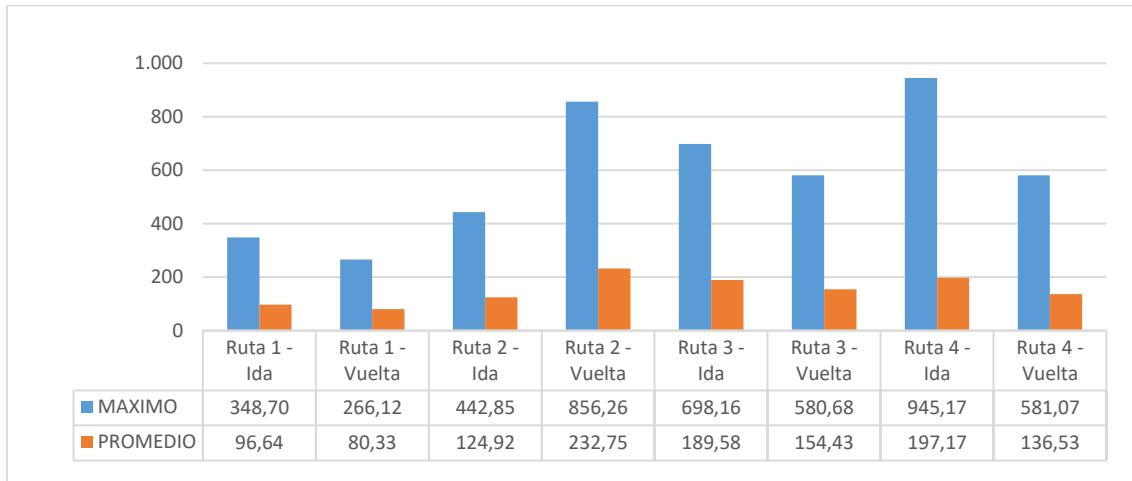


Figura 24: Potencias requeridas (kW) en cada una de las cuatro rutas. Valores máximo y promedio

Por este motivo se desglosaron las potencias por rangos de valores, y así comprobar cuáles eran las potencias más empleadas para cada caso. Bajo esta premisa se analizaron las rutas que se mostraron más exigentes en términos energéticos (Rutas 3 y 4), y se comprobó que aproximadamente el 10% de los datos se correspondían con valores excesivos de acuerdo a los datos base utilizados.

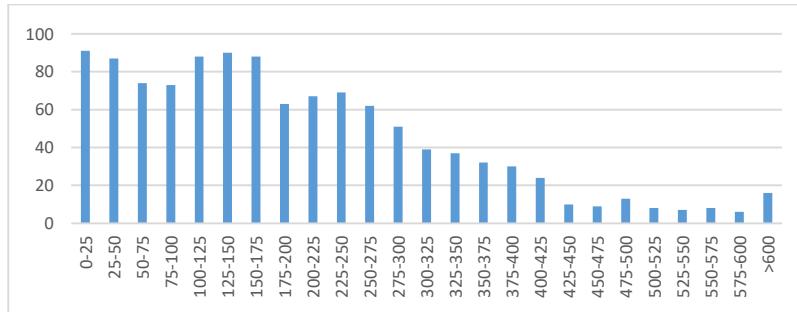


Figura 25: Distribución de los valores de potencias en la ruta 4 (kW)

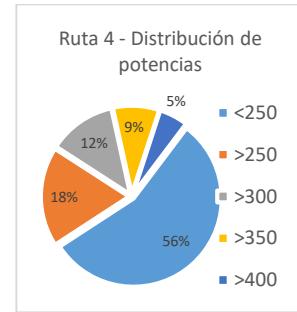


Figura 26: Distribución de las potencias de la ruta 4 por rangos

Adicionalmente se examinó el comportamiento del vehículo de hidrógeno con la motorización inicial prevista de 140kW de potencia nominal en base a la demanda de potencia exigible. Además, se incorporó al análisis la potencia pico del motor, de 160kW, aunque solo puede mantenerla durante 16 segundos de acuerdo a las prescripciones del fabricante.

Las figuras 26 y 27 recogen este examen para dos de las rutas, de exigencia moderada y alta.

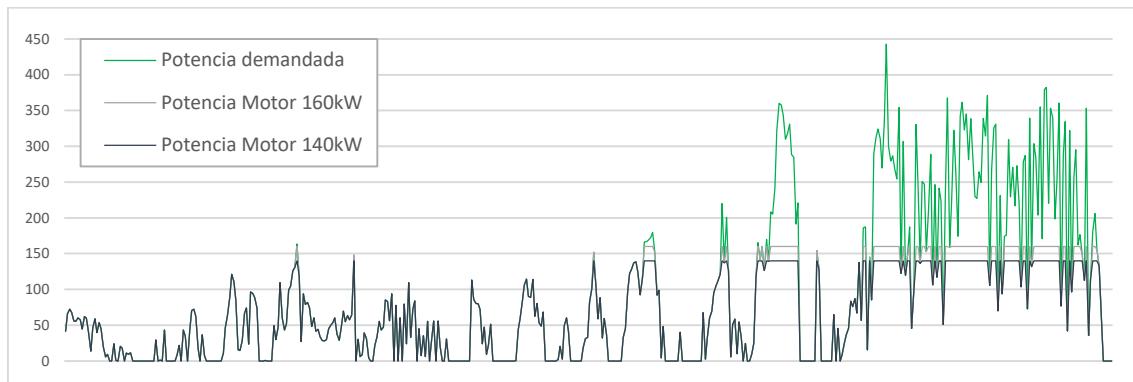


Figura 27: Ruta 2. Potencia requerida vs. Potencia cubierta por el motor a capacidad nominal y pico (kW)

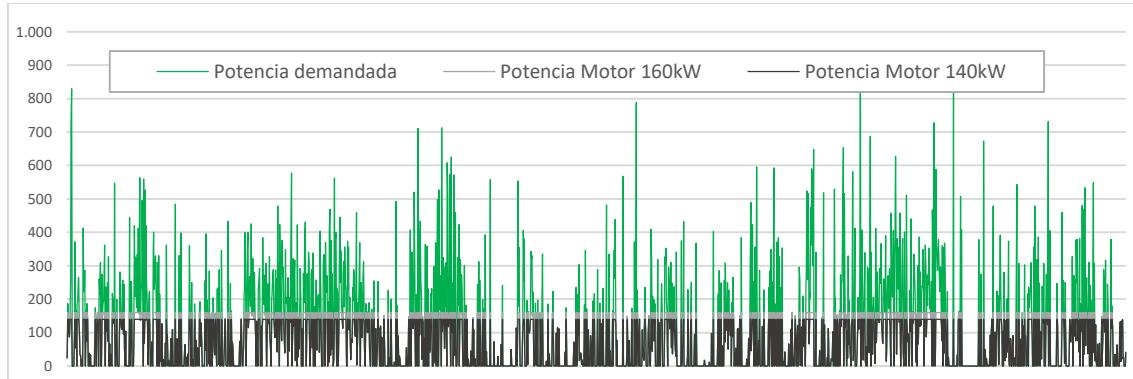


Figura 28: Ruta 4. Potencia requerida vs. Potencia cubierta por el motor a capacidad nominal y pico (kW)

Los resultados reflejan que dicho motor (140kW) presenta importantes limitaciones, incluso en el caso de que se trate de rutas de exigencia moderada.

Solución propuesta

Para paliar la falta de potencia se ha optado por una solución tecnológica que incorporan muchos vehículos eléctricos (por ejemplo, el camión de bomberos Rosenbauer XT mencionado anteriormente). Esta solución consiste en instalar dos motores de las mismas características, por lo que se conseguiría una potencia total de 280kW, alcanzando los 320kW de potencia pico.

Sin embargo, esta modificación implica recalcular los requerimientos de energía, ya que la instalación del motor adicional conlleva una serie de modificaciones en la masa del vehículo. En primer lugar, se va a producir un incremento del peso debido a la instalación del segundo motor. Por otro lado, la nueva configuración requiere de un re-dimensionamiento de los demás elementos, que deberán tener mayores prestaciones y, por lo tanto, una masa superior.

Siguiendo los criterios de diseño del primer modelo, la nueva cadena de tracción estaría integrada por los siguientes componentes:

Elemento	Características	Unidades	Peso total conjunto (kg)
Motor	280 kW (2x140kW)	2	294
Pila de combustible	120 kW	1	250
Baterías	35 kWh (56/112 kW)	4	1180
Tanque de hidrógeno	7,5 kg H ₂ a 350 bar	6	606

Tabla 14: Dimensionamiento de los elementos de la nueva cadena de tracción de hidrógeno

Estas modificaciones hacen que el peso total de la cadena de tracción, junto a los componentes ya enumerados antes, ascienda a los 2.397kg, superando en 747kg a la cadena inicialmente planteada. Esto significa un aumento de la masa del nuevo camión de hidrógeno respecto al anterior del 1,05%, que se aplicará a la energía demandada, para poder recalcular la potencia.

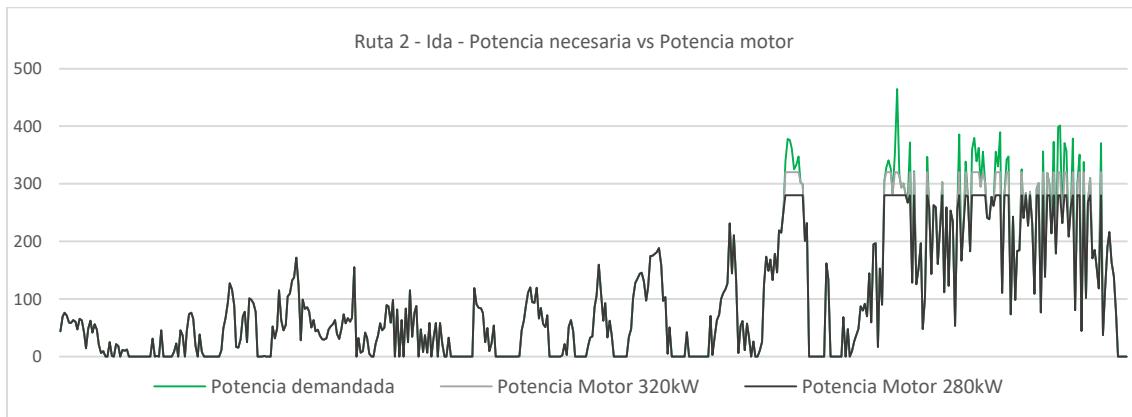


Figura 29: Ruta 2. Cobertura de la demanda de potencia con la nueva cadena de tracción (kW)

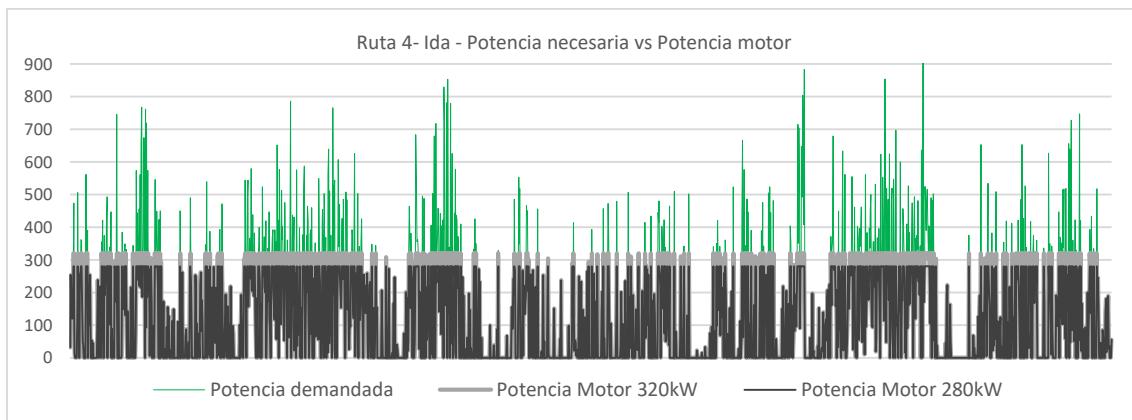


Figura 30: Ruta 4. Cobertura de la demanda de potencia con la nueva cadena de tracción (kW)

Con la potencia recalculada para la nueva masa del camión se examinan de nuevo las gráficas de la potencia cubierta por la nueva configuración de dos motores. Gracias a la nueva cadena, para los casos de exigencia baja y moderada **los motores podrían llegar a cubrir** en gran parte la potencia exigida.

En las rutas más críticas (3 y 4), la nueva configuración con dos motores y mayor apoyo de las baterías mejora sustancialmente el grado en el que este camión de hidrógeno podría cubrir las funciones del camión diésel. Para aquellos casos donde no se llega a cubrir, habrá una penalización en la energía cinética, ya que la potencia del motor se destinará a vencer (a) la fuerza de la gravedad en caso de que se esté subiendo una pendiente, (b) la de rodadura y (c) la aerodinámica. Es decir, el camión será capaz de subir el mismo desnivel, pero a costa de hacerlo a una velocidad inferior a la que lo haría el camión diésel.

Validación del motor

Como se ha comentado en la metodología de cálculo, se han seleccionado varios puntos de las distintas rutas para identificar si los requerimientos de potencia y par en esos instantes cumplían las especificaciones que puede proporcionar el motor. Dichos puntos se han seleccionado como una muestra representativa dentro del rango de operación que podría considerarse normal, evitando aquellos puntos críticos que podrían haber sido originados por errores en la medición.

Los resultados obtenidos se han incorporado a la tabla de especificaciones del motor en la Figura 30. Esta gráfica está modificada sobre la original del fabricante, ya que en el diseño de este trabajo se ha optado por la instalación de dos motores en paralelo, por lo que se consigue duplicar su capacidad de par y potencia, y los valores que aparecen corresponden al doble del motor original.

Como se puede observar, los puntos seleccionados se encuentran dentro del margen de operación de los motores en la práctica totalidad de los casos. Aunque para un estudio más exacto sería preciso repetir este proceso para todos los puntos de cada una de las rutas.

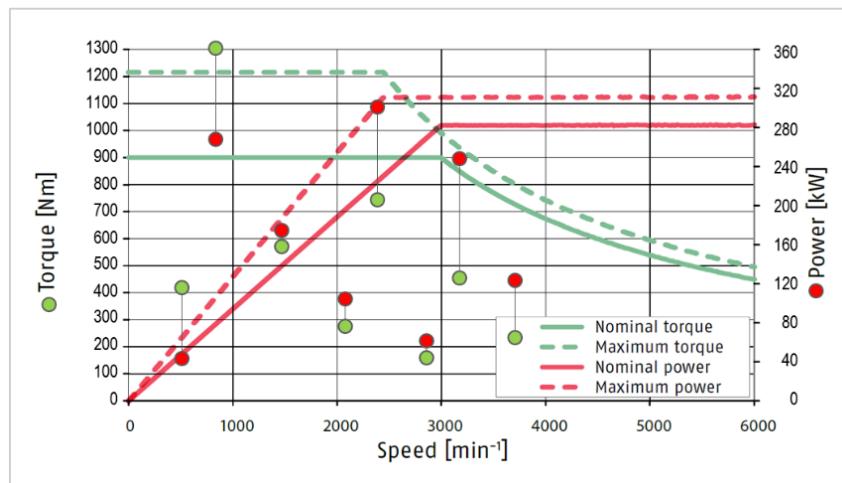


Figura 31: Validación de puntos de trabajo de la nueva cadena de tracción de acuerdo al par y potencia requeridos

5.2.1.4. Validación del modelo de acuerdo a la normativa europea

Como se ha comentado anteriormente, la norma UNE-EN 1846 establece una serie de requerimientos para los vehículos de extinción de incendios y servicios auxiliares de los cuerpos de bomberos.

En este apartado se va a comprobar que el modelo de camión de hidrógeno desarrollado es capaz de cumplir dichas especificaciones, a pesar de que no son de obligado cumplimiento:

Autonomía de 300km

Inicialmente los tanques del vehículo ya se han diseñado de acuerdo a este parámetro, pero hace falta comprobar que el consumo energético de las rutas es inferior a la cantidad que pueden proporcionar los tanques. La tabla 15 muestra esta comparación con la Ruta 4 (completa), que ha sido la de mayor consumo, demostrando que el camión tiene autonomía suficiente para cubrir toda la intervención.

Capacidad total H ₂	Capacidad energética total	Gasto ruta más exigente	Combustible consumido
45 kg	1.498,5 kWh	247,20 kWh	16,49%

Tabla 15: Comprobación de la autonomía del camión de hidrógeno

Alcanzar 65km/h en 17 segundos

Para la validación de este apartado será preciso utilizar las fórmulas:

$$t = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{\gamma} \quad [s]$$

$$\gamma = \frac{F_{rueda\ camión}}{M_{eq}} \quad [m/s^2]$$

$$T_{rueda} = F * r_{rueda\ camión}$$

Siendo:

- γ : Aceleración del cuerpo en movimiento
- M_{eq} : Masa equivalente del vehículo, teniendo en cuenta los elementos rotantes (1% de la masa total del vehículo)
- T_{rueda} : Par obtenido en las ruedas del camión
- $F_{rueda\ camión}$: La fuerza aplicada en cada una de las ruedas motrices [N]
- $r_{rueda\ camión}$: Radio de la rueda del camión teniendo en cuenta la deformación [m]

Sabiendo que la velocidad que hay que alcanzar en el periodo de tiempo establecido es de mínimo 65km/h (requiere una aceleración de 1,06 m/s²), y que la masa del vehículo es de 15.090kg, utilizamos las ecuaciones mencionadas para obtener el par necesario en cada rueda, y que asciende a 3.433 Nm.

Aplicando la siguiente ecuación se consigue conocer el par que debe proporcionar el motor:

$$T_{motor} = \frac{T_{rueda}}{\eta_T * R_T}$$

Donde:

- η_T : Es el rendimiento de la transmisión motor-rueda (92%)
- R_T : Es la relación de transmisión entre el motor y las ruedas, que suele encontrarse entre los valores 5 y 10 (7,5)

El resultado es un par motor necesario del motor de 943,52 Nm. Si se compara con la gráfica del motor eléctrico Par-Potencia-RPM, se comprueba que el par máximo de una unidad es de unos 640Nm, sin embargo, dado que nuestro sistema está compuesto por dos motores en paralelo, el par motor máximo que podría suministrar nuestra unidad es de unos 1280Nm. De este modo, el camión propulsado por el sistema de tracción de hidrógeno desarrollado cumpliría la norma en este apartado.

Recorrer 100m en 15 segundos

En esta prueba, utilizamos la siguiente fórmula para conocer la aceleración necesaria para cumplir el requisito.

$$e = v_0 + \frac{1}{2} \gamma t^2 \quad [m]$$

Siendo:

- E: Distancia a recorrer (100m)
- V₀: Velocidad inicial (0 km/h)
- T: Tiempo en recorrer los 100m
- Γ: Aceleración del vehículo

Así se consigue el valor de la aceleración necesaria (0,89 m/s²) para cumplir el objetivo. Repitiendo los cálculos anteriores con esta aceleración se obtiene un par de motor necesario de 395,32Nm, que como se ha visto antes, también se encontraría dentro del rango de operación del motor seleccionado.

Hay que recalcar que en ambos casos estamos haciendo aproximaciones lineales. El cálculo completo requeriría analizar el par del motor en función del régimen de revoluciones y una serie de operaciones más complejas, pero esta versión implicada puede servir para hacernos una idea de que efectivamente el vehículo cumpliría el criterio operativo.

Peso del vehículo

La masa de partida del camión era de 13.400 kg. La adición del primer sistema de hidrógeno ha supuesto un balance de +747,96 kg.

Tras la incorporación del segundo motor y del redimensionamiento del resto de equipos, se ha producido un balance respecto a la primera versión de +747,00 kg.

Sumando ambas cantidades obtenemos que el peso final del camión de hidrógeno diseñado **asciende a 14.894,96 kg**, por lo que sigue estando dentro de la MTC autorizada (15T).

5.2.2. Análisis económico

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de estudiar la viabilidad de incorporar una nueva tecnología a un proceso, servicio, etc. es el de realizar un estudio del impacto económico que la inversión en los nuevos equipos va a suponer.

En este proyecto se realizará el estudio de los gastos en los que la administración que adquiera un vehículo de estas características a lo largo de la vida del camión, estimada en 15 años, agrupando las inversiones en los grupos que aparecen a continuación.

Ante la variabilidad de información que existe en torno al sector del hidrógeno, en algunos de estos grupos se han planteado dos horizontes, uno más positivo (*Best Scenario*), y otro más negativo (*Worst Scenario*). Así será posible conocer el rango de costes entre los que será muy probable que se encuentre la situación real futura del sector del hidrógeno.

5.2.2.1. *Valor inicial y residual:*

El coste de la adquisición del BUP objeto de estudio fue de 283.000 (IVA incluido). Dado que la compra se realizó en el año 2012, se ha llevado a cabo un estudio de mercado a través de las últimas licitaciones adjudicadas para el suministro de camiones similares en otros servicios de prevención y extinción de incendios de diversas administraciones, reflejados en la Tabla 16.

Entidad contratante	Fecha	Tracción	Potencia (CV)	Cabina	Cisterna (l)	Coste (IVA inc.)
Ayuntamiento de Lugo	30/08/2022	4x2	270	Doble	>3.000	468.270 €
Ayuntamiento de Logroño	17/01/2022	4x2	299	Doble	3.000-3.500	371.754 €
Ayuntamiento de Vigo	31/05/2021	4x2	360	Doble	>3.000	395.258 €
Ayuntamiento de Zamora	29/03/2021	4x2	299	Doble	3.000	427.045 €
Diputación de Valladolid	27/07/2020	4x2	360	Doble	4.650	399.275 €

Tabla 16: Estudio de las licitaciones para camiones de bomberos tipo BUP

De este modo, para la fecha actual se ha estimado el precio de compra de un BUP de estas características en **412.320 €**.

En el caso del camión de pila de combustible de hidrógeno, existe poca información y una gran disparidad en cuanto al coste inicial que podría suponer, abarcando desde los 200.000 hasta los 600.000€. Para el caso concreto de este proyecto se ha establecido un precio base para la cabeza tractora de hidrógeno de 300.000€, a lo que hay que sumar el carrozado para convertirlo en camión de bomberos. Tras diversas conversaciones con proveedores de este servicio, se ha establecido el sobrecoste en 200.000€.

También es necesario conocer la depreciación de los vehículos para identificar el valor residual al final de su vida útil. Dicho valor está estimado en un 20% para los camiones de gasoil, mientras que para el de hidrógeno se ha fijado en el 10% (*Worst Scenario*) y en el 20% (*Best Scenario*).

5.2.2.2. *Gastos administrativos*

Los seguros, así como los impuestos de circulación, van a suponer el mismo importe tanto para la motorización diésel como para la de hidrógeno. Algunos estudios cifran este coste en el 1% del valor del vehículo, aunque en este caso se dispone de la información real, que vendría a representar el 4% del valor total del camión a lo largo de toda su vida útil.

En cuanto a la Inspección Técnica de Vehículos, representa un importe muy reducido en comparación con el resto, pero aun así ha sido tenida en cuenta. Para los camiones, durante los 10 primeros años esta inspección ha de ser anual y, tras esa fecha, semestral. Respecto a su importe, actualmente no hay publicadas tasas para camiones eléctricos, de modo que se ha realizado una extrapolación a partir del importe de la ITV para un turismo eléctrico.

5.2.2.3. Costes de mantenimiento

Los vehículos destinados a los SPEIs cuentan con un modo de operación muy particular, ya que se trata de unidades que no realizan muchos kilómetros a lo largo de su vida útil. Sin embargo, se utilizan muchas veces en parado con la toma de fuerza activada (para bombear agua, izar una escalera o brazo, mover una grúa, etc.) Por este motivo es preciso tener en cuenta todas esas horas de operación con el vehículo en marcha, pero detenido. Este régimen de trabajo estacionario se ha estimado que representa 60km por cada hora de funcionamiento al ralentí.

Así, a los 74.273,33km que realizaría el camión en sus 15 años de vida útil, hay que sumar otros 61.417,6km que se corresponderían a las 1.023 horas de trabajo al ralentí en ese mismo periodo de tiempo.

En el informe FCHDT se recogen varias estimaciones del coste de mantenimiento de diversos tipos de camiones. Para los cálculos de este proyecto se van a utilizar los siguientes, que coinciden mejor con el actual coste de mantenimiento de un camión diésel que realiza entre 80.000 y 90.000km anuales, que podría situarse entre los 2.500 y los 4.500€:

- Diésel: 0,046€/km
- FCEV 350 bar:
 - Best Scenario: 0,035 €/km
 - Worst Scenario: 0,041 €/km
- BEV: 0,037€/km

La mayor sencillez del FCEV respecto del diésel conlleva unos menores gastos de mantenimiento, sin embargo, aunque es un sistema similar al de los BEV, sus componentes requieren un mayor número de operaciones que éstos, y de ahí su mayor coste. Sin embargo, se ha incluido también una opción más optimista, en la que se prevé que los costes puedan reducirse significativamente ante el crecimiento del sector.

En este apartado no se han tenido en cuenta los gastos procedentes de las posibles averías que suelen padecer los vehículos de este tipo.

5.2.2.4. Coste del combustible

Actualmente existe una gran incertidumbre sobre la evolución del precio de hidrógeno para los futuros años, que dependerá de múltiples factores en función del aumento de vehículos con esta motorización. De este modo, se han planteado dos escenarios posibles:

- Worst Scenario: Se partirá del precio actual que suele tener el kg de hidrógeno, y se mantendrá para los 15 años de vida útil del vehículo. El consumo de hidrógeno se mantendrá en 0,07kg/km.
- Best Scenario: Se partirá del precio actual que suele tener el kg de hidrógeno, y se irá reduciendo a lo largo de la vida útil, siguiendo una aproximación (Tabla 17) por la cual el precio se mantiene constante durante los primeros años, para luego reducir de forma rápida, y llegar a un precio fijo al final de ese periodo. El consumo de hidrógeno se habrá conseguido mejorar y será de 0,06kg/km.

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
10	10	10	9,5	9	8,5	8	7,5
2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	MEDIA
7	6	5	4,5	4,5	4	4	7,2

Tabla 17: Evolución del precio del hidrógeno en los próximos años

Este cálculo tendrá en cuenta también el consumo realizado en régimen de ralentí. Como se ha indicado anteriormente, para el gasoil se ha establecido en 1,5litros por cada hora de trabajo. Para conocer esa cantidad en kg de hidrógeno, se ha realizado la conversión del carburante a energía, aplicando luego las eficiencias propias de la cadena de tracción y pila de hidrógeno.

En cuanto al precio utilizado en la venta de gasoil, actualmente se encuentra desvirtuado por la coyuntura energética mundial, por lo que se realizó un análisis de la evolución del precio por litro en los últimos 10 años. De este modo se tomó como indicadores el año previo a la pandemia (2019) y el posterior al confinamiento y anterior a la guerra de Ucrania (2021), para marcar un precio de 1,250€/litro. En este caso también se han supuesto dos escenarios:

- Uno con este coste mantenido durante 15 años, estimando que pueda haber reducciones y subidas de precio que mantengan la media en ese valor.
- Otro con el coste actualizado con un IPC del 1,6%, que se ha obtenido como media de los últimos 10 años anteriores al comienzo del conflicto en Ucrania.

Estas combinaciones dan lugar a la Figura 31, donde se recogen estos cuatro escenarios.

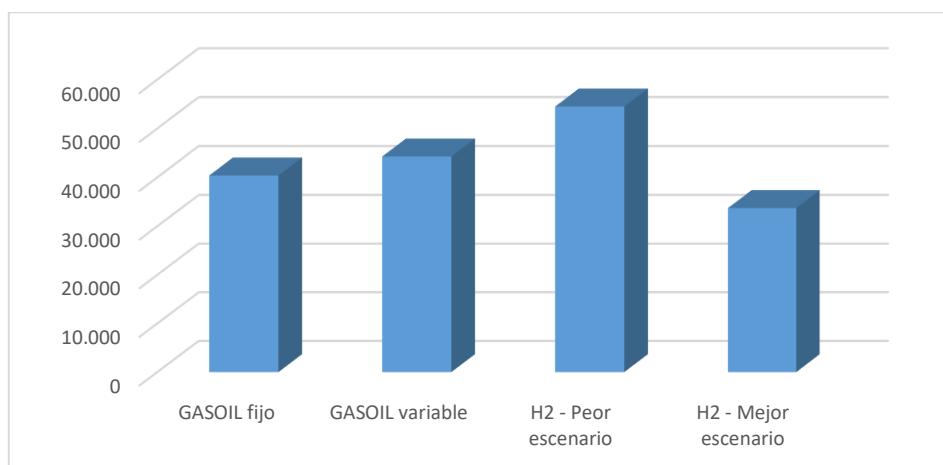


Figura 32: Gasto en combustible en la vida útil del camión (€)

5.2.2.5. Total Cost of Ownership (TCO)

Una vez se han calculado los costes directos e indirectos relacionados con la propiedad del camión, se obtiene la Tabla XX, donde quedan agrupados para tres supuestos: Vehículo Diésel, Vehículo de Hidrógeno (peor escenario) y Vehículo de Hidrógeno (mejor escenario).

TCO	Camión de gasoil		Camión de H ₂ (worst scenario)		Camión de H ₂ (best scenario)	
Concepto	Gasto anual	Gasto total	Gasto anual	Gasto total	Gasto anual	Gasto total
Valor inicial y residual						
Adquisición	-	412.320	-	783.000	-	550.000
Valor residual	-	82.464	-	78.300	-	110.000
Resumen		329.856		861.300		660.000
Gastos administrativos						
Seguro	643	9.645	643	9.645	643	9.645
Impuestos	237	3.559	71	1.067	71	1.067
ITV	70	1.403	50	1.015	50	1.015
Resumen		14.607		11.728		11.728
Costes de mantenimiento						
O&M	416	6.241	370	5.563	316	4.749
Resumen		6.241		5.563		4.749
Combustibles						
Combustible	2.691	40.377	3.691	54.479	2.248	33.720
Resumen		40.377		54.479		33.720
TOTAL		391.083 €		933.071 €		711.012 €

Tabla 18: Total Cost of Ownership para los camiones ICE y FCEV

Los datos de la tabla anterior se recogen gráficamente en la Figura X, donde se puede observar mucho mejor, el elevado peso que representa la compra del vehículo frente al resto de costes. Y es que, aunque en la mayoría de ellos se prevé un ahorro por la posesión del vehículo de hidrógeno frente al diésel, la inversión total prácticamente duplica a la que hay que acometer con un camión tradicional.

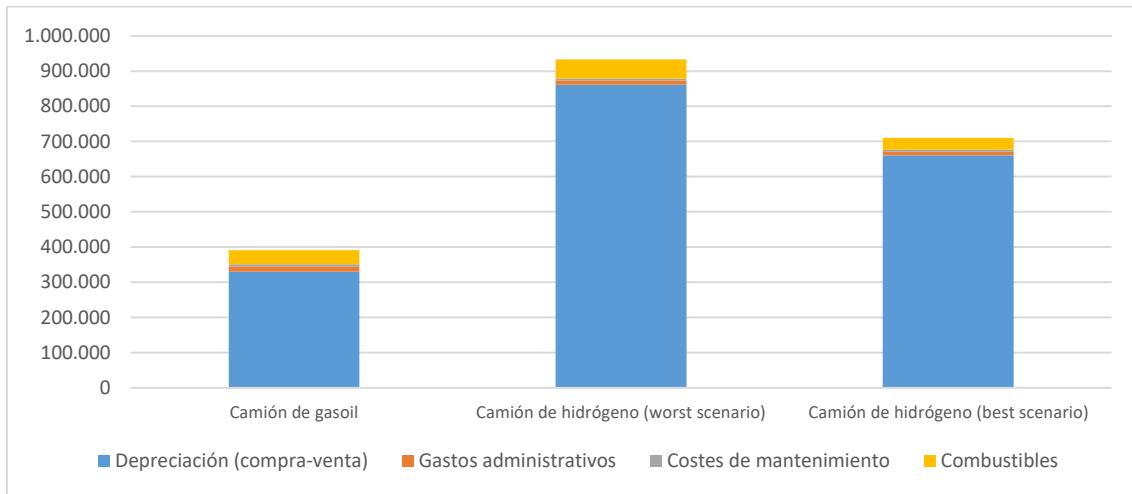


Figura 33: TCO de las distintas opciones disponibles (€)

5.2.3. Impacto Medioambiental

Una de las razones por las que están surgiendo fuentes de propulsión alternativas a los motores de combustión es el impacto medioambiental que estos suponen. Si bien la utilización de estas nuevas tecnologías (biofuels, vehículos eléctricos, pilas de combustible, etc.) puede reducir las emisiones generadas durante el uso de los vehículos, es preciso realizar un análisis más exhaustivo que permita abordar todas las fases de la vida de estos productos. Esto permitirá garantizar que realmente se consigue una reducción de emisiones y de que la huella de carbono y el impacto medioambiental de dichos vehículos es efectivamente inferior al de los que se pretende sustituir.

En este estudio se van a presentar las emisiones de CO₂ que se generan a lo largo del ciclo de vida de tres tipos de camiones: combustión interna (ICE), eléctrico de baterías (BEV) y de pila de combustible (FCEV).

A pesar de que se está realizando una comparación y adaptación de un camión de gasoil, en el caso del impacto medioambiental se ha incluido a los vehículos eléctricos ya que, como se verá, la utilización de materiales críticos en los componentes del vehículo de hidrógeno supone una clara mejoría respecto a la alternativa que se presenta como sustituta de los camiones de gasoil.

Para cada uno de estos casos se tendrá en cuenta la fase de fabricación del vehículo, la de generación de la energía para propulsarlo y la de su utilización como medio de transporte. La fase de retirada / reciclaje presenta actualmente muchas incógnitas para la tecnología de vehículos de hidrógeno, y más aun concretamente para el caso de camiones o camiones de bomberos, por lo que se ha descartado del análisis.

5.2.3.1. Fabricación del vehículo

EMISIONES DE CO₂

Esta primera fase del ciclo de vida abarca las emisiones de CO₂ liberadas durante el proceso de fabricación, comprendiendo desde la extracción de los materiales necesarios hasta su montaje y puesta a punto.

De acuerdo al informe del American Transport Research Institute, “Understanding the CO₂ Impacts of Zero-Emission Trucks”, las emisiones asociadas al proceso de fabricación de un camión con tres motorizaciones diferentes son las siguientes:

Parte del proceso	ICE	BEV	FCEV
Producción de componentes	25.470,76	22.661,86	44.195,99
Ensamblaje	3.887,60	3.419,07	4.958,59
Batería	169,80	189.268,51	1.601,26
Fluidos	4.397,90	1.687,52	1.687,52
TOTAL	33.926,51	217.036,97	52.443,36

Tabla 19: Emisiones de CO₂ asociadas al proceso de fabricación.

El aspecto más destacable al hacer esta comparativa es que el proceso de fabricación del camión eléctrico cuenta con una huella de carbono muy superior a la de las otras opciones. Esto se debe, principalmente, al proceso de fabricación de las baterías, donde el FCEV también sale algo penalizado respecto al ICE.

MATERIAS CRÍTICAS USADAS

Las nuevas generaciones de vehículos buscan reducir su dependencia de los combustibles fósiles. Pero, en contrapartida, van a demandar muchos otros recursos naturales, algunos de los que pueden ser incluso más escasos que el propio petróleo. De hecho, un gran número de ellos han sido declarados como críticos por la Comisión Europea y otros organismos debido a su vulnerabilidad, su importancia económica y su impacto medioambiental.

Muchos de estas materias primas se destinarán a la producción de componentes para las baterías, la iluminación, los motores eléctricos y la electrónica de potencia, entre otros, por lo que se hace preciso tenerlos especialmente en cuenta estas partes de los vehículos en los análisis medioambientales.

Como se ha visto, la principal diferencia entre los tres modelos reside sobre todo en la fabricación de las baterías. Esto es debido a que, para poder conseguir las autonomías necesarias por este tipo de camiones, se precisan baterías de gran capacidad para el caso de los BEV. En el caso de los FCEV, que incorporan su propia fuente de generación eléctrica, éstas no precisan ser tan grandes, aunque si, que suponen una diferencia respecto a los ICE.

A continuación, se muestra la distribución de pesos por tipo de elemento del camión, donde se observa la importancia que las baterías juegan en la distribución de masas.

Componente	ICE	BEV	FCEV
Truck Components	7.934,82	6.637,93	9.432,76
Chassis (w/o battery)	4.622,63	4.622,63	4.622,63
Body	1.519,08	1.519,08	1.519,08
Powertrain	1.371,99		692,35
Transmission System	428,58	182,96	186,14
Traction Motor		283,30	289,65
Electronic Controller		29,96	30,87
Hydrogen Tank Onboard Storage			2.092,49
Battery	125,30	7.767,03	123,49
Lead Acid	125,30	31,33	31,33
Li-Ion		7.735,71	92,16
Fluids	202,94	130,30	130,30
Total Weight (kg)	8.270,06	14.535,26	9.687,00

Tabla 20: Distribución de pesos en distintos camiones, por componentes

Si bien el chasis representa el principal peso del vehículo, el material más utilizado en su fabricación es el acero (78%), que actualmente no constituye un material denominado crítico, del mismo modo que ocurre con el resto de materiales empleados en esta parte del vehículo (goma, hierro, aluminio, plásticos).

Nos centraremos ahora en analizar los materiales críticos de cada tipo de vehículo, que como se ha descrito, se va a deber principalmente a la incorporación de elementos electrónicos.

A continuación, se detallan los metales empleados en la producción de los distintos tipos de vehículos (en la categoría de turismo).

Elemento	ICEV Diésel	ICEV Petrol	PHEV	BEV	FCEV
Ag	10,19	19,47	28,00	29,80	
Al	61.103,00	78.343,00	14.137,00	200,00	300
As	0,14	1,30			
Au	3,15	3,65	0,20	0,32	
B	23,76	26,37			
Ba	832,55	777,66			
Be	0,03	0,02			
Bi	8,81	8,84			
Cd	0,15	0,12			
Ce	2,67	0,37	49,67	0,15	
Co	9,72	8,06	2.712,00	933,00	
Cr	5.041,00	5.566,00	651,00	6.031,00	
Cu	15.584,00	15.376,00	59.166,00	150,00	
Dy	0,19	0,48	13,81	18,73	
Eu	0,00	0,00	0,23	0,23	
Fe	701.095,00	653.524,00	806.140,00	746.945,00	
Ga	0,27	0,27	0,81	1,12	
Gd	0,00	0,00	0,17	0,17	
Ge	0,00	0,00	0,05	0,08	
Grafito	0,00	0,00	0,00	0,00	4500
Hf	0,00	0,01			
Hg	0,05	0,00			
In	0,22	0,21	0,38	0,38	
Ir	0,02	0,00			
La	0,34	0,40	7,38	7,38	
Li	22,06	4,63	2.242,00	7.709,00	
Mg	13.622,00	3.565,00			
Mn	4.333,00	4.211,00	5.968,00	553,00	
Mo	240,03	187,97	260,00	260,00	
Nb	154,20	145,57	426,30	426,30	
Nd	23,71	18,84	552,79	749,30	
Ni	159,00	2.993,00	16.049,57	55.724,00	
Pb	12.527,00	11.535,00	975,00	975,00	
Pd	1,99	1,84	0,94		
Pr	0,07	0,08	51,48	98,00	
Pt	3,79	0,13	5,51		0,75
Rh	0,12	0,09	0,01		
Ru	0,01	0,01			
Sb	15,70	35,36			
Se	0,01	0,02			
Sm	0,21	0,33	2,32	3,15	
Sn	208,53	234,61			
Sr	148,84	144,08			
Ta	4,65	6,53	10,83	10,83	
Tb	0,01	0,02	13,62	26,93	
Te	0,20	0,18			
Ti	541,41	536,41			
V	92,81	86,62	852,61	790,00	
W	9,24	3,17			
Y	0,07	0,13	0,41	0,41	
Yb	0,00	0,00	0,08	0,16	
Zn	6.614,00	6.502,00			
Zr	12,50	78,42			
KG TOT	822.450,42	783.947,28	910.318,17	821.643,44	4.800,75

Tabla 21: Utilización de metales en la fabricación de vehículos (gr)

De todos estos elementos que componen los vehículos eléctricos y de pila de combustible, nos vamos a centrar en aquellos que están clasificados como “críticos” por la Comisión Europea (Joint Research Center – Raw Materials Information System).

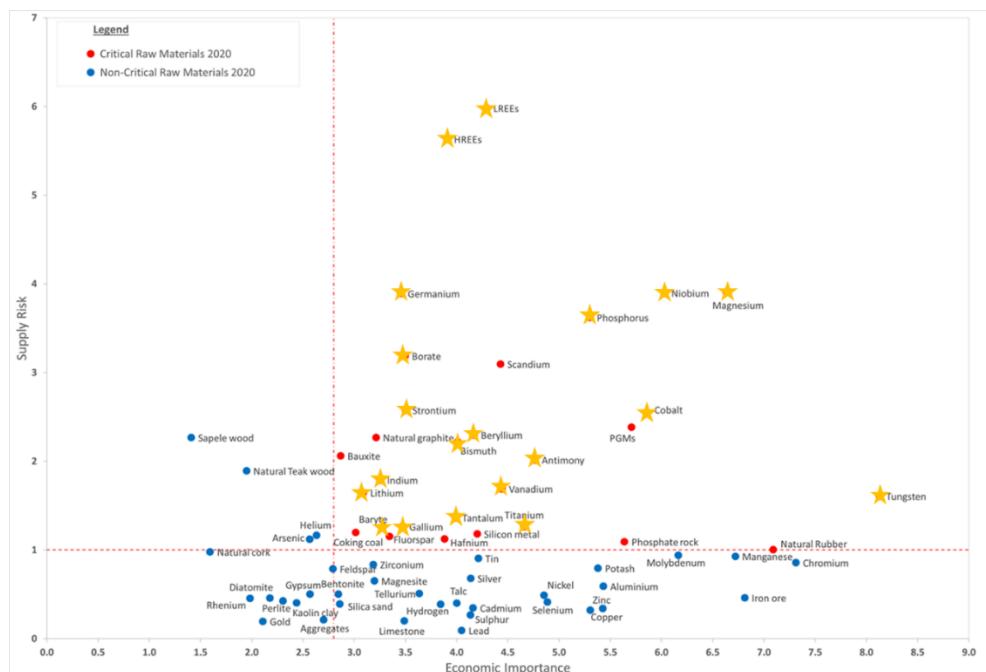


Figura 34: Metales críticos usados en la fabricación de vehículos eléctricos y de hidrógeno

Cruzando la información de la Comisión Europea con el listado de materiales de los vehículos analizados, obtenemos la siguiente gráfica:

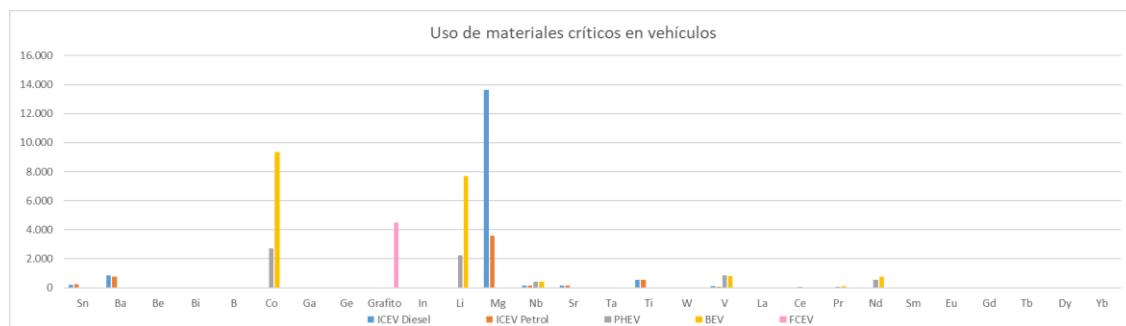


Figura 35: Uso de materiales críticos en vehículos (gr)

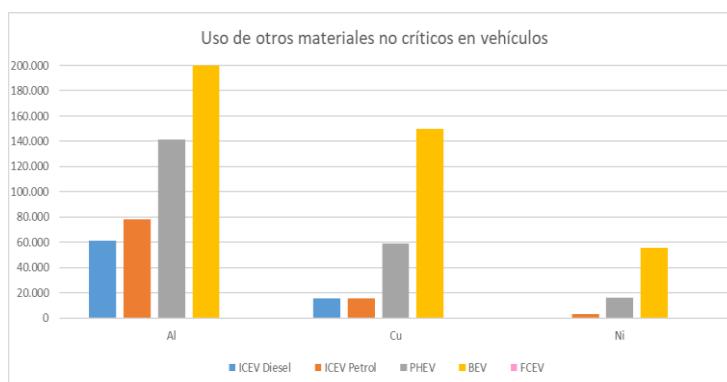


Figura 36: Metales no críticos usados en la fabricación de vehículos

Así se puede observar el gran incremento que se produce en el consumo de materiales clasificados como críticos, como el Co, y el Li, así como otros metales que no tienen la consideración de críticos, como el Al, el Cu o el Ni.

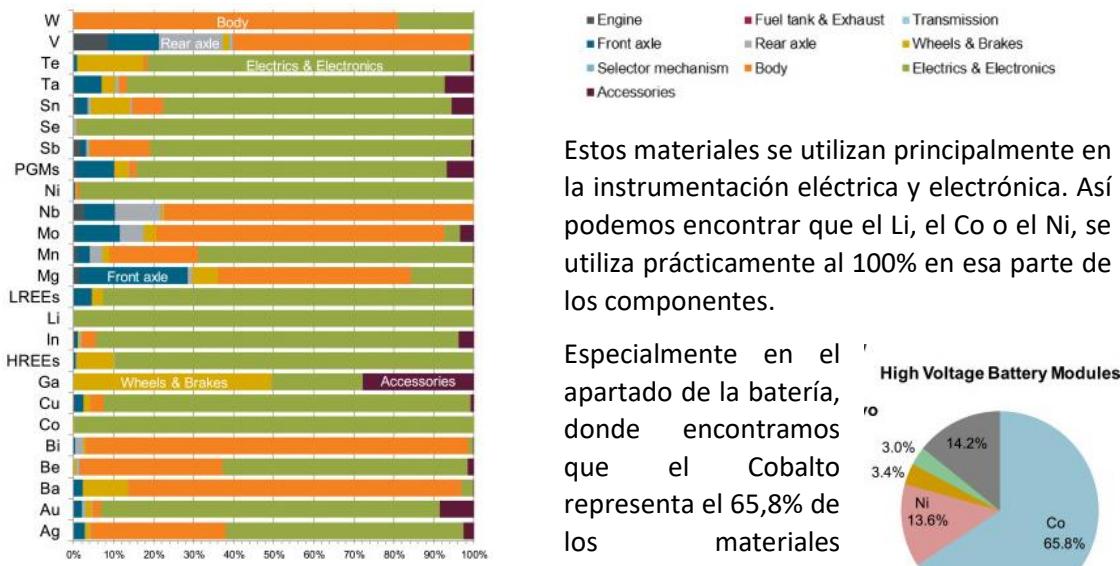
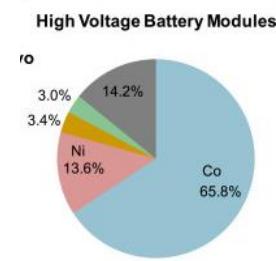


Figura 37: Distribución de los materiales usados en la fabricación de vehículos eléctricos.

Estos materiales se utilizan principalmente en la instrumentación eléctrica y electrónica. Así podemos encontrar que el Li, el Co o el Ni, se utiliza prácticamente al 100% en esa parte de los componentes.

Especialmente en el apartado de la batería, donde encontramos que el Cobalto representa el 65,8% de los materiales empleados, el Níquel el 13,6% y el Litio el 3,4%.



5.2.3.2. Producción del combustible

El siguiente punto analizado es la huella de carbono derivada de la producción de la fuente de energía, desde su extracción/generación hasta su puesta a punto a los usuarios finales, conocido como *Well-to-Tank*.

Gasoil: En este caso las emisiones asociadas a la producción de gasoil van a depender de muchos factores como el lugar de extracción, los canales de distribución etc. Pero para este estudio se emplearán los datos recopilados por el American Transportation Research Institute, que establece para el gasoil unas emisiones de 0,44 kg/litro generado.

Electricidad: Para la electricidad de los BEV se ha tomado como referencia el último dato aportado por REE, donde se establece que para el año 2022 se obtuvieron unas emisiones de CO2 de 0,16 kg/kWh. Para la realización de los cálculos se empleará este dato, aunque las previsiones de que en el futuro el peso de las renovables en el mix energético aumente propiciarán una drástica reducción de dichas emisiones.

Hidrógeno: De un modo similar al que ocurre con la electricidad, el tipo de hidrógeno que se utilice en la propulsión del vehículo va a influenciar de forma decisiva las emisiones de CO2 generadas. En 2020 la producción de hidrógeno ascendió a 90Mt, habiéndose estimado que dicha producción conllevó la emisión de 90 Mt de CO2, es decir, 10 kg de CO2 por g de H₂ producido. Este dato se ve corroborado por el ATRI, que establece que la producción de 1kg de H₂ conlleva la emisión de 9,37 kg de CO2. Sin embargo, estos datos comprenden los distintos tipos de hidrógeno que se producen, y que son:

- **Hidrógeno gris:** Obtenido a partir de combustibles fósiles, principalmente mediante gas natural a través del reformado del metano. Representa más del 90% de la producción de hidrógeno. Tiene unas emisiones asociadas de 1046-613 g CO2 / km recorrido.
- **Hidrógeno azul:** Se considera hidrógeno bajo en carbono, derivado de fuentes no renovables que cumple con un determinado umbral de reducción de las emisiones de GEI del 70%. Suele producirse mediante reformado de metano con captura y almacenamiento de carbono. Tiene unas emisiones asociadas de 80-368 g CO2 / km recorrido.
- **Hidrógeno verde:** Se obtiene a partir de fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica y la eólica. Este proceso tecnológico se conoce como electrólisis del agua, y en él la electricidad empleada proviene 100% de energías renovables. Tiene unas emisiones asociadas de 20-90 g CO2 / km recorrido.

Estos datos quedan resumidos en la siguiente tabla, donde se recogen las emisiones totales por la producción de la energía que será consumida por el camión objeto de estudio a lo largo de su vida útil (74.273,33 en 15 años).

Concepto	DIESEL	BEV	FCHDT - Gris	FCHDT - Azul	FCHDT - Verde
Consumo	0,47 l/km	1,42 kWh/km	0,07 kg/km	0,07 kg/km	0,07 kg/km
Energía consumida	34.908,46 Litros	105.468,13 kWh	5.199,13 kg	5.199,13 kg	5.199,13 kg
Emisiones CO2	0,44 kg/litro	0,16 kg/kWh	10,00 kg/kg H ₂	2,86 kg/kg H ₂	0,71 kg/kg H ₂
Emisiones TOT. (kg CO2)	15.359,73	16.874,90	51.991,33	14.854,67	3.713,67

Tabla 22: Emisiones totales de CO2 en la producción del combustible

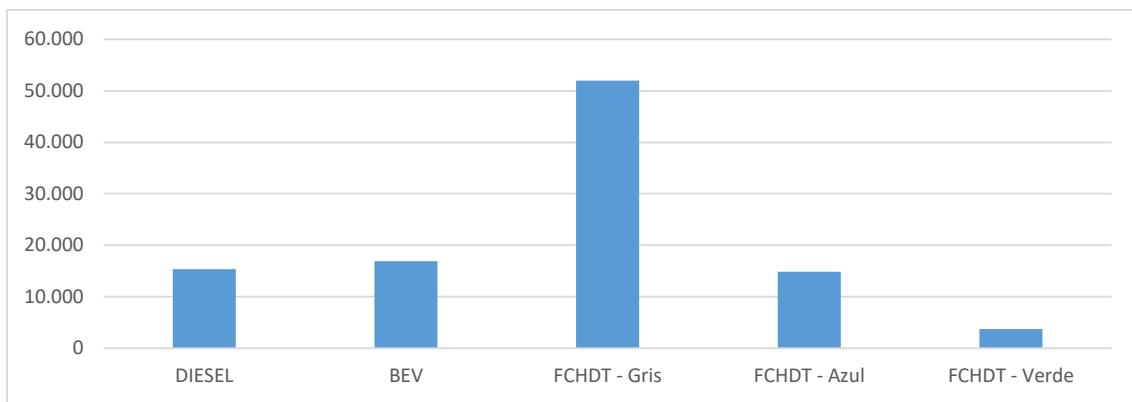


Figura 38: Emisiones de CO2 asociadas a la producción de la fuente de energía (kg), por tipo de vehículo

Es decir, el potencial de reducción de emisiones del camión de hidrógeno respecto de la motorización diésel, se va a ver enormemente influenciado por la forma en la que se produzca el hidrógeno a consumir.

Estos datos habrán de sumarse a los del resto del análisis medioambiental, para así poder determinar si la utilización de hidrógeno gris, que produce cerca de cuatro veces más CO2 que el camión diésel, realmente compensa el ahorro de emisiones de CO2 que se produce durante la utilización del vehículo.

5.2.3.3. Consumo del combustible

El gasóleo es un derivado del petróleo, que está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados, y un 25% de hidrocarburos aromáticos. Dentro de los hidrocarburos saturados encontramos las isoparafinas y las cicloparafinas, mientras que dentro del segundo grupo encontramos los naftlenos y los alcalobencenos. La fórmula química general del diésel común es C₁₂H₂₆, y en su composición predomina el carbono, constituyendo en torno al 80% del total.

Para la obtención de la energía necesaria para propulsar el coche, el motor realiza la combustión del gasoil en su interior. Si esta combustión fuera perfecta, solo obtendríamos CO₂ y H₂O. Pero dado que la reacción química no llega a ser perfecta y que existen otros elementos en la composición del combustible, se generan otros compuestos químicos, como son los óxidos de nitrógeno (NOx: monóxido de nitrógeno, monóxido de dinitrógeno, trióxido de dinitrógeno, tetróxido de dinitrógeno, dióxido de nitrógeno y pentóxido de dinitrógeno.)

Junto con el CO₂, estos gases ocasionan una importante problemática medioambiental, especialmente el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nítrico (NO). Por este motivo, los vehículos diésel han ido incorporando progresivamente diversos sistemas para capturar parte de esas emisiones.

A continuación, se muestran las emisiones de acidificadores, precursores del ozono y gases de efecto invernadero, que produce camión pesado diésel del año 2012.

EMISIONES	SO ₂	NOx	COVNM	CH4	CO	CO ₂	N2O	NH ₃
g /km	0,004	4,987	0,095	0,024	1,066	772,490	0,025	0,003
kg vida útil	0,30	370,40	7,06	1,78	79,18	57.375,4	1,86	0,22

Tabla 23: Principales emisiones contaminantes por la combustión de gasoil en un camión pesado

En este caso, la reducción de emisiones de todos estos gases durante la fase de uso de los vehículos BEV y FCEV es del 100%.

5.2.3.4. Balance total

En este apartado se recoge un resumen de todas las emisiones que se producen teniendo en cuenta las distintas fases en el ciclo de vida del vehículo, a excepción, como se ha comentado, de la fase final. Esa fase requiere de un estudio mucho más exhaustivo para analizar qué componentes deben ser depositados en vertedero, y cuáles pueden ser reciclados o reutilizados a día de hoy, o podrían llegar a serlo ante la evolución tecnológica del sector.

VEHÍCULO	FABRICACIÓN	PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA	USO	TOTALES kg)
DIESEL	33.896,02	15.359,73	57.375,41	106.631,2
BEV	216.841,92	16.874,90	-	233.716,8
FCEV - Gris	52.396,23	51.991,33	-	104.387,6
FCEV - Azul	52.396,23	14.854,67	-	67.250,9
FCEV - Verde	52.396,23	3.713,67	-	56.109,9

Tabla 24: Balance total de las emisiones de CO₂ en la vida útil de un camión

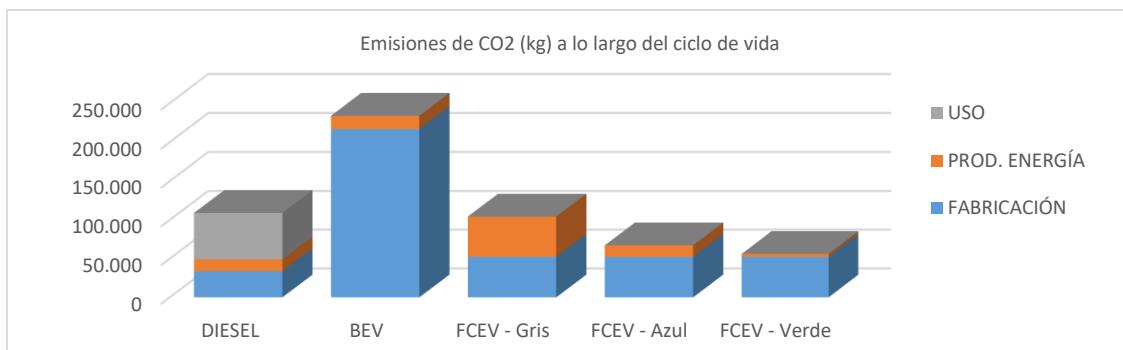


Figura 39: Balance total de las emisiones de CO₂ en la vida útil de un camión

Tal y como muestran los datos, el hidrógeno en la automoción se postula como una sólida alternativa para reducir las emisiones de GEI, y más concretamente, de CO₂. Sin embargo, para garantizar este hecho, es preciso que el hidrógeno verde desplace a las otras variantes de producción. Además, la innovación tecnológica en cuanto a pilas y baterías, además de dirigirse a aumentar su eficiencia y prestaciones, debe ir encaminada a conseguir procesos de producción más sostenibles. Este hecho es un factor determinante, tal y como se aprecia en el fuerte impacto que tiene la fabricación de BEV, principalmente por el uso de materias críticas.

5.2.4. Criterios adicionales

5.2.4.1. Adaptación de la cadena de tracción

En la sección “5.2.2. Análisis Económico” se ha planteado la adquisición de un camión de bomberos de hidrógeno completamente nuevo. A pesar de ello, el presente trabajo también persigue hacer un pequeño estudio de los problemas que pueden encontrar los fabricantes de camiones y las empresas dedicadas a carrozar este tipo de vehículos, en el caso de tener que adaptar un chasis existente de motorización diésel al sistema propulsado por pila de combustible de hidrógeno.

La elaboración del estudio cuenta con las siguientes etapas:

1. En primer lugar, se tiene que identificar la ubicación de los elementos de la cadena de tracción original que pueden ser removidos.

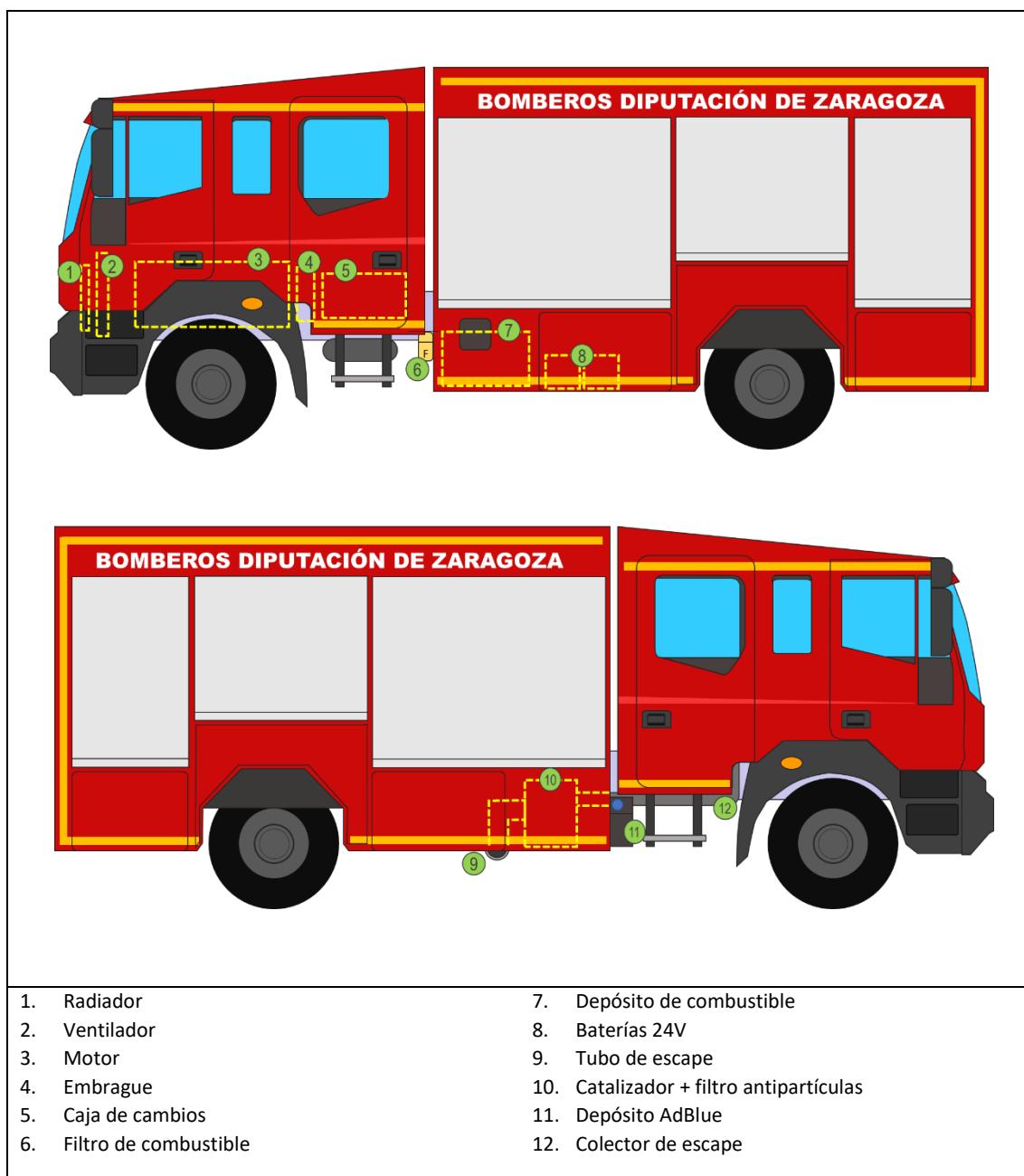


Figura 40: Ubicación de los principales elementos de la cadena de tracción diésel

2. En segundo lugar, se ha de dimensionar los espacios disponibles una vez suprimidos estos componentes. También es preciso definir el tamaño de los nuevos componentes (motor eléctrico, pila, etc.) que deberán montarse sobre el chasis del camión. Para simplificar los cálculos, el estudio se centrará exclusivamente en los elementos principales:

CADENA TRACCIÓN DIÉSEL			CADENA TRACCIÓN HIDRÓGENO		
Elemento	Uds.	Volumen tot. (L)	Elemento	Uds.	Volumen tot. (L)
Motor	1	900;1350;650 789,75	Motor	2	2x(513;295;436) 2 x 65,98
Depósito combustible	1	750;650;450 219,37	Depósitos hidrógeno	6	6 x (3190; Ø430) 6 x 463,01
Catalizador + FAP	1	650;400;420 109,2	Pila de combustible	1	596;745;985 437,35
Caja de cambios (transmisión)	1	1000;500;400 200	Baterías	4	960;686;302 2 x 198

Tabla 25: Comparación de tamaños para los elementos de las cadenas de tracción

3. Finalmente, y con todos los datos anteriores, se estudia la ubicación idónea de cada elemento, tanto en términos de volumen disponible como de operatividad. La idea es que la instalación de los nuevos elementos no requiera de modificaciones importantes de la estructura, o la incorporación de más elementos, de modo que no se incurra en un coste adicional, o que al menos este no sea excesivo.

Así, el hueco donde se encuentra actualmente el motor y la caja de cambios podría ser ocupado por **los dos nuevos motores** montados en paralelo, ya que el ancho de estos (295mm) permitiría su instalación en los 900mm que dejaría libres el motor. Así, estarían situados cerca del radiador para evitar su sobrecalentamiento, y quedarían alineados para transmitir el movimiento al eje, a través del REPARTIDOR DE PAR.

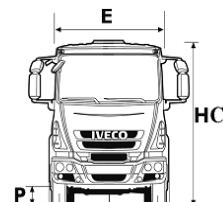
Debido a que estos motores tienen un tamaño muy compacto, todavía sería posible albergar la **pila de combustible** en dicho hueco. A pesar de su gran volumen, podría situarse por debajo de los dos motores, y el volumen ocupado por ambos sistemas seguiría siendo inferior al liberado por el motor de gasoil.

Para **las baterías**, si bien el hueco que se puede crear al retirar el depósito de combustible y el catalizador no es suficiente para alojarlas, realmente estos componentes cuentan con espacio a su alrededor que se podría aprovechar, aunque sería preciso reorganizar algún otro componente. Así, se dispondrían las baterías en bloques de 2 a cada lado del camión, en la zona de compartimentos inferiores. Con este diseño se conseguiría bajar el centro de gravedad del vehículo, puesto que las baterías son uno de los componentes más pesados (1.180 kg en su conjunto).

El aspecto más crítico resultaría ser la ubicación de los **tanques de hidrógeno**, ya que se trata de 6 unidades y cuentan con un peso total de 600kg. Pero el principal problema radica en sus dimensiones (3m de longitud), que imposibilitan su instalación vertical o transversal, ya que el ancho de cabina (E) es de 2.330mm y el alto de cabina (HC) es de 2.672mm.



Figura 40: Radiador, ventilador, y motor de un camión IVECO de 6 cilindros



Por este motivo, la solución de diseño pasaría por instalarlos en el eje longitudinal. Una opción sería situarlos en el techo, aunque habría que estudiar cómo afectaría esto a la dinámica del vehículo. Posiblemente su CDG se vería modificado, aunque dado que se han instalado 4 baterías con un peso total de 1.180kg cerca del suelo, el efecto de añadir peso al techo podría verse compensado en cierto modo.

Con todo ello, el diseño del nuevo camión podría quedar de la siguiente manera:

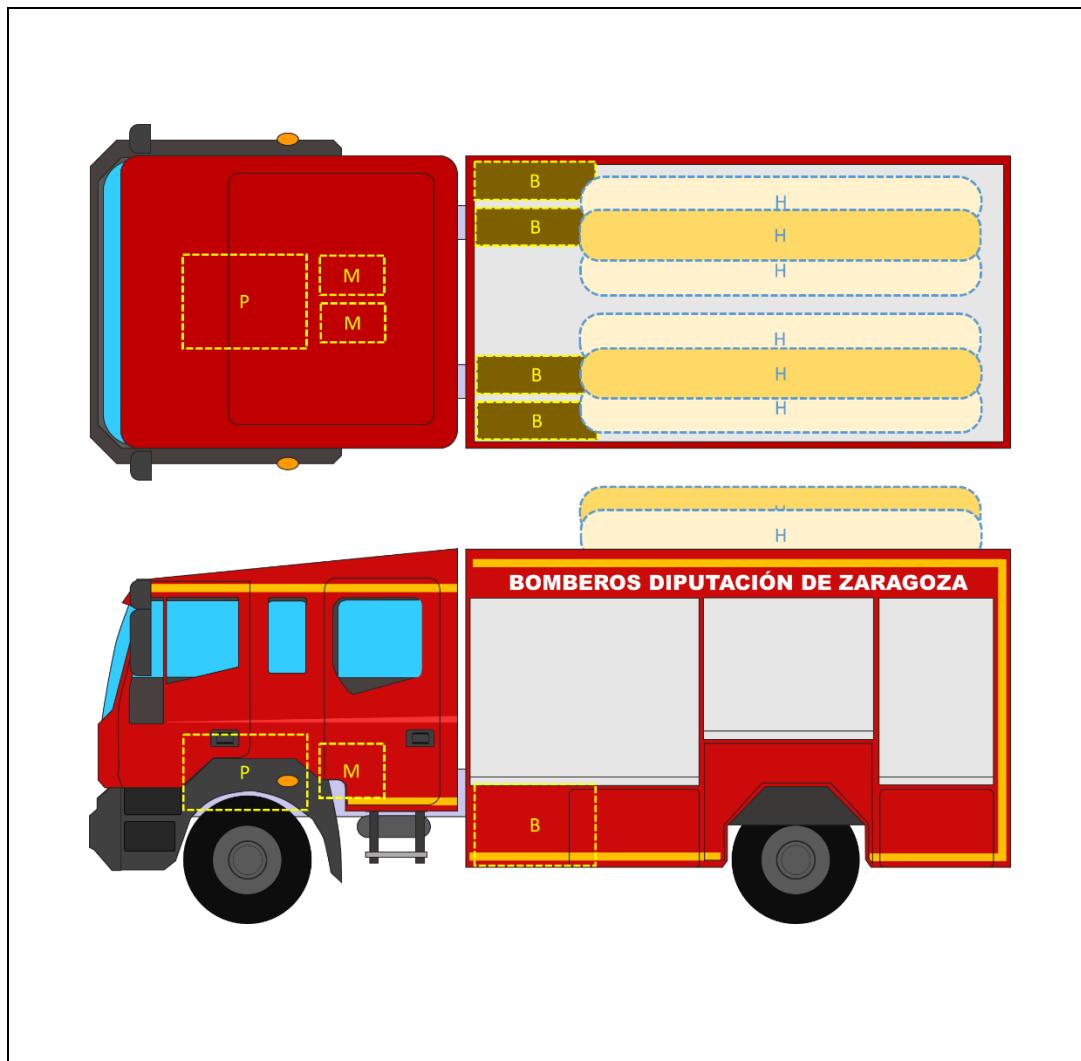


Figura 41: Posible ubicación de los elementos de la cadena de tracción de hidrógeno

5.2.4.2. Infraestructura de carga

El despliegue de los vehículos de hidrógeno está supeditado, entre otras cosas, a la implementación de una infraestructura de carga efectiva. La Unión Europea está trabajando en nuevas normativas que exigirán a los países miembros tener un punto de recarga de hidrógeno cada 150 km. Aunque la norma se refiere principalmente la red transeuropea de transporte (TEN-T) y corredores secundarios, que en España cubre las principales autovías.

Sin embargo, la normativa también busca que la mayor distancia entre puntos de carga de hidrógeno fuera de la TEN-T, sea de 450 km. Y, además, que haya, mínimo, un punto de recarga de hidrógeno en cada nodo urbano.

En este trabajo la autonomía del camión se ha diseñado para poder cubrir 300km sin repostar. Tal y como se muestra la figura 42, el radio de actuación del BUP del parque de Calatayud es de unos 45km (90km teniendo en cuenta el retorno), aunque siguiendo el trazado de la carretera esta distancia puede aumentarse considerablemente. Por ejemplo, la Ruta 4 tenía como destino el municipio de Illueca, que está en el radio de 20km de acuerdo a la figura. Sin embargo, la distancia real recorrida por el camión fue de 42km. En esa ruta (de alta exigencia), se consumió un 16% del tanque de hidrógeno, lo que hace presuponer que el dimensionamiento actual es suficiente para el ámbito de actuación y el tipo de intervenciones que se llevan a cabo por el BUP de este servicio provincial.

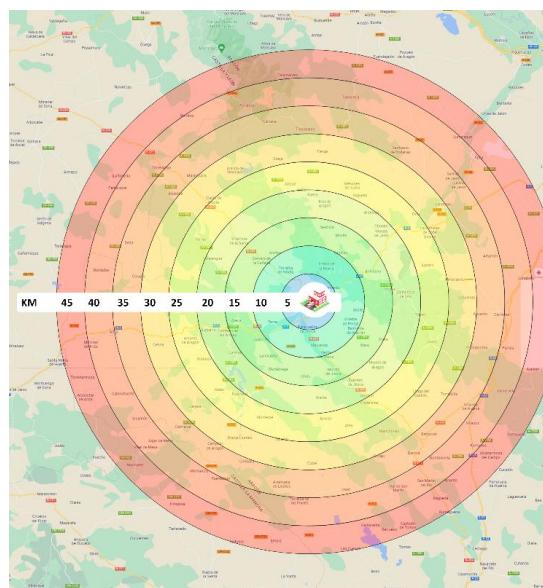


Figura 42: Radio de actuación del parque de bomberos de Calatayud

Además, el análisis de las rutas comprendía tanto el transporte de ida y vuelta al siniestro como la propia intervención. Este cálculo se basa en el hecho de que, en caso de adquirir un vehículo de estas características en el futuro, sería preciso disponer de un punto de recarga en el propio parque de bomberos. En la Figura XX, se recogen las estaciones de servicio en la zona cubierta por el parque de Calatayud, suponiendo que en el futuro exista una red similar para el hidrógeno. Además, se ha indicado aquellas zonas que se encuentran más alejadas de una estación de servicio, comprobando que por lo general, la distancia máxima a un punto de repostaje puede encontrarse entre los 15 y los 20km.

Sin embargo, en la práctica, el número real de estaciones de las que poder abastecerse es muy inferior, ya que muchas pertenecen a cooperativas, o no tienen servicio de abastecimiento de 24h. Por este motivo y hasta que exista una red completa de puntos de recarga, es imperativo que exista un depósito de almacenamiento de hidrógeno en el parque de bomberos.

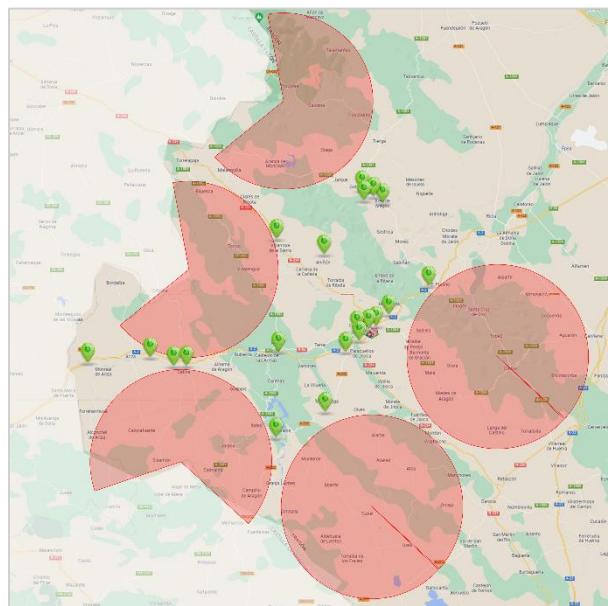


Figura 43: Ubicación de las estaciones de servicio, y zonas más alejadas de ellas

La existencia de puntos de abastecimiento en los propios parques de bomberos no es algo extraordinario, si no que en algunas ocasiones ya se da este supuesto. Por ejemplo, el Parque de bomberos Nº1 del Ayuntamiento de Zaragoza, o el Parque de Tarazona de la Diputación de Zaragoza, cuentan con sendos depósitos de 2.000 litros de capacidad.

Se podría realizar un símil con otro combustible como el hidrógeno mediante unos pocos cálculos, que, tendrían que tener en cuenta en todo caso, el diferente consumo que tiene cada tecnología. El resultado daría una idea del tamaño de los tanques necesarios para abastecer la flota de vehículos:

Consumo [litros/km]	0,42	Consumo [kg/km]	0,07
Consumo [kJ/km]	15.315,3	Consumo [kJ/km]	8.400
Relación entre consumos			
55%			
Tamaño depósito [l]	2000	Tamaño equivalente [kg]	607,75
		Tamaño efectivo [kg]	333,34

Tabla 26: Dimensionado del depósito de combustible en un parque de bomberos

De estos cálculos se desprende que un depósito de 333kg podría desempeñar la misma función que realizan los depósitos anteriormente mencionados.

6. CONCLUSIONES

A lo largo del proyecto, se ha estudiado el diseño de una cadena de tracción impulsada con pila de combustible de hidrógeno, para ser incorporada a un camión de bomberos.

Esta tecnología se presenta como una alternativa prometedora frente a los tradicionales combustibles fósiles. Pero todavía son necesarios muchos esfuerzos de investigación y demostración, que permitan garantizar la fiabilidad técnica de estos sistemas, especialmente cuando se trata de vehículos destinados a los servicios de emergencias.

Este proyecto ha abordado el análisis comparativo con una cadena homóloga diésel desde varios enfoques:

En el aspecto técnico, los resultados obtenidos muestran la gran importancia que tiene, en cualquier estudio científico, la **fase de recolección de datos**. Para un mejor análisis, hubiera sido preciso utilizar dispositivos de medida mucho más precisos, o haber realizado múltiples mediciones, así como procesos de filtrado y tratamiento de datos mucho más exhaustivos. A pesar de ello, los estudios desarrollados en las cuatro rutas planteadas permiten obtener una aproximación del grado en el que un camión de bomberos de hidrógeno podría satisfacer las prestaciones que se le requieren.

El diseño de la cadena planteada **ha demostrado cumplir las recomendaciones** de la norma UNE-EN 1846-2:2011. Vehículos contra incendios y de servicios auxiliares. Parte 2: Requisitos comunes. Seguridad y prestaciones, en cuanto a autonomía y aceleración. Además, para las rutas menos exigentes, de intensidad baja o baja-media, el sistema propuesto, compuesto por dos motores, permite cubrir casi por completo las necesidades de potencia y par. Sin embargo, en las **rutas con mayor nivel de exigencia, los motores no eran capaces** de entregar toda la potencia necesaria. Esto implicaría que ante el aumento de la demanda energética (bien porque se aumenta la velocidad o porque se afronta un mayor desnivel), el camión sería capaz de responder, pero a costa de sufrir una penalización en la velocidad, mayor que la que sufriría el camión diésel.

Un análisis más profundo permitiría saber en qué grado se ve afectada la velocidad del camión en cada tramo ante esa falta de potencia. Esto, a su vez, daría información sobre el tiempo adicional que supondría atender una emergencia con un camión de hidrógeno respecto a uno diésel, un factor de vital importancia cuando se habla de servicios de urgencias.

En el ámbito económico, la fase de desarrollo en la que se encuentra esta tecnología provoca que los **costes de adquisición**, tanto del propio vehículo como de los distintos componentes, sean **muy superiores** a los de motorizaciones tradicionales. Para el resto de partidas presupuestarias, tan solo es reseñable la diferencia económica que existe entre el gasto en combustible. Pero se trata de un elemento con una gran volatilidad para el caso del diésel, y una gran incertidumbre para el del hidrógeno, sumado al hecho de que representa un porcentaje muy bajo de toda la inversión en un camión. Así, atendiendo solo al aspecto económico, será preciso que bajen los costes de producción para que los camiones de hidrógeno puedan tener cabida en los servicios de bomberos, ya que sería muy complejo para una administración pública, justificar el gasto tan elevado en una alternativa de este tipo.

Por último, uno de los principales motivos que ha propiciado la aparición de los vehículos propulsados por pila de hidrógeno es la cuestión medioambiental. La investigación realizada ha corroborado un hecho conocido: es necesario analizar todo el ciclo de vida para conocer la idoneidad de esta tecnología como sustituta de los combustibles fósiles. Los procesos de fabricación y la utilización de materiales críticos en la construcción de los componentes del

camión, causan un mayor perjuicio al medioambiente que los ICE. Pero este hecho se puede **compensar con la falta de emisiones de los FCEV**, siempre y cuando se garantice que el hidrógeno consumido se ha obtenido mediante **fuentes renovables**. De lo contrario nos encontraremos en una situación muy parecida a la actual, al menos en lo que a emisiones de CO₂ se refiere.

Dificultades afrontadas

En términos generales, acceder a información sobre este tipo de tecnologías se ha convertido en una tarea complicada. En primer lugar, para algunos componentes existen solo unos pocos fabricantes, cuya información disponible además es limitada. Por otro lado, en algunos casos también se da una gran disparidad entre los datos publicados por distintos organismos en torno a datos y previsiones sobre los sistemas de propulsión con hidrógeno.

Por otro lado, como se ha comentado ya, mejorar los procesos de toma de datos facilitaría los cálculos posteriores y aumentaría la fiabilidad de los resultados.

Acciones futuras

El proyecto abre la puerta a nuevas líneas de investigación que den continuidad a la idea de que los camiones de los servicios de bomberos puedan ser propulsados por hidrógeno. Este trabajo se ha centrado en un tipo determinado de vehículo, pero se podría llevar a cabo estudios similares con las demás clases de vehículos que integran los SPEIs.

De forma paralela, el estudio comparativo que se ha realizado entre un camión diésel y uno de hidrógeno, también podría extrapolarse a otro diésel-eléctrico o eléctrico-hidrógeno.

El proyecto ha tratado de abarcar muchos de los aspectos que habría tener presente en caso de que un servicio deseara adquirir un vehículo de estas características. Dada la gran cantidad de cuestiones analizadas, en algunos de esos casos no se ha podido llegar a profundizar de forma considerable. Por este motivo, se podrían abordar proyectos de investigación de mayor envergadura y calado en algunas de dichas cuestiones.

Así, otra línea de investigación podría analizar en detalle la infraestructura de abastecimiento. En el apartado “5.2.4.2. Infraestructura de carga” se ha hecho un cálculo básico sobre el tamaño que podría tener un depósito de hidrógeno ubicado en un parque de bomberos. Sin embargo, un análisis más exhaustivo podría desarrollar también los costes de instalación y O&M de dicho tanque, así como los requisitos técnicos y de seguridad necesarios. Incluso se podría plantear la posibilidad de producir el hidrógeno in situ, mediante el uso de energías renovables, y analizar su viabilidad técnica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mrintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press.
- IEA (2022), Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021, IEA, Paris.
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>
- IEA, CO2 emissions from energy combustion and industrial processes, 1900-2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2021>
- Fast Facts: U.S. Transportation Sector GHG Emissions (pdf) (EPA-420-F-22-018, May 2022).
- Study Summary – Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty's High Performance Green Solution. FUEL CELLS AND HYDROGEN 2 JOINT UNDERTAKING. December 2020.
https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/study-fuel-cells-hydrogen-trucks_en
- Report “Vehicles in use. Europe 2022”. European Automobile Manufacturers’ Association (ACEA). <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-in-use-europe-2022/>.
- Comparison of hydrogen and battery electric trucks. Methodology and underlying assumptions. June 2020. Transport & Environment.
- Understanding the CO2 Impacts of Zero-Emission Trucks. American Transportation Research Institute.
- Potential options and technology pathways for delivering zero-carbon freight in Spain. Cambridge Econometrics.
<https://www.camecon.com/what/our-work/zero-emissionroad-freight-transport-in-Spain/>
- UNE-EN 1846-2:2011. Vehículos contra incendios y de servicios auxiliares. Parte 2: Requisitos comunes. Seguridad y prestaciones

8. GLOSARIO

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle

BEV – Battery Electric Vehicle

GNL – Gas Natural Licuado

GNC – Gas Natural Comprimido

CO2 - Dióxido de carbono (CO2)

CH4 – Metano

N2O – Dióxido de nitrógeno

HFC Hidrofluorocarbonos

PFC - Perfluorocarbonos

SF6 - Hexafluoruro de azufre

GHG – Green House Gas

FCH HDT – Fuel Cell Hydrogen Heavy Duty Truck

ICE – Internal Combustion Engine

IPCC - Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

SPEI – Servicio de Prevención y Extinción de Incendios

BUP – Bomba Urbana Pesada

CDG – Centro de Gravedad

MTC – Masa Total en carga. Masa en vacío del vehículo, más la masa del resto de la dotación de personal prevista en el diseño del vehículo, calculada en 90kg por individuo con su equipo personal y 15kg para el equipo personal del conductor, y la masa de los agentes extintores y de los demás equipos que se transportan.

MMA - hace referencia a la masa máxima autorizada que puede llegar a tener un vehículo (es decir, la tara más la carga útil) para circular por vías públicas dentro de la legislación vigente.

Índice de figuras y tablas

Índice de figuras

<i>Figura 1: CO₂ emissions [Gt] from energy combustion and industrial processes, 1900-2021</i>	6
<i>Figura 2: Consumo energético por tipo de fuente y sector para los estados de la UE.....</i>	7
Figura 3: Emisiones de GEI en los estados de la UE (Millones de T de CO ₂ equivalentes)	7
<i>Figura 4: Emisiones de GEI (%) del sector del transporte en los estados de la UE.....</i>	8
Figura 5: Emisiones de GEI (%) del sector del transporte por carretera en los estados de la UE ..	8
Figura 6: Emisiones de GEI en USA por sector en 2020.....	8
Figura 7: Emisiones de GEI en el sector del transporte por medio. 2020	8
Figura 8: Total de vehículos en uso en Europa (unidades)	10
Figura 9: Total de camiones en Europea (unidades).....	10
Figura 10: Vehículos (turismos) en uso en Europa por fuente de energía. 2020.....	10
Figura 11: Camiones en uso en Europa por fuente de energía. 2020.....	11
<i>Figura 12: Comparación de la madurez tecnológica de distintas cadenas de tracción en camiones</i>	11
Figura 12: Bomba Urbana Pesada objeto de estudio.....	17
Figura 13: Camión eléctrico de bomberos. Rosenbauer RT	18
Figura 14: Validación de los datos de velocidad con distintas aplicaciones.....	25
Figura 15: Validación de las mediciones de altitud con los datos del IGN	26
Figura 16: Ejemplo de depuración de datos erróneos.....	26
Figura 17: Procedimiento de la metodología de cálculo seguido	34
<i>Figura 18: Perfil de velocidad y altitud de la ruta 1</i>	35
Figura 19: Balance energético de la ruta 1	35
Figura 20: Perfil de velocidad y altitud de la ruta 1	36
Figura 21: Balance energético de la ruta 1	36
Figura 22: Comparación del consumo de energía de las cuatro rutas.....	36
Figura 23: Potencias requeridas (kW) en cada una de las cuatro rutas. Valores máximo y promedio	37
Figura 24: Distribución de los valores de potencias en la ruta 4 (kW)	37
Figura 25: Distribución de las potencias de la ruta 4 por rangos	37
Figura 26: Ruta 2. Potencia requerida vs. Potencia cubierta por el motor a capacidad nominal y pico (kW)	38
Figura 27: Ruta 4. Potencia requerida vs. Potencia cubierta por el motor a capacidad nominal y pico (kW)	38
Figura 28: Ruta 2. Cobertura de la demanda de potencia con la nueva cadena de tracción (kW)	39
Figura 29: Ruta 4. Cobertura de la demanda de potencia con la nueva cadena de tracción (kW)	39
Figura 30: Validación de puntos de trabajo de la nueva cadena de tracción de acuerdo al par y potencia requeridos	40
Figura 31: Gasto en combustible en la vida útil del camión (€)	45
Figura 32: TCO de las distintas opciones disponibles (€)	46
Figura 33: Metales críticos usados en la fabricación de vehículos eléctricos y de hidrógeno	50
Figura 34: Uso de materiales críticos en vehículos (gr)	50
Figura 35: Metales no críticos usados en la fabricación de vehículos.....	50
Figura 36: Distribución de los materiales usados en la fabricación de vehículos eléctricos.	51
Figura 37: Emisiones de CO ₂ asociadas a la producción de la fuente de energía (kg), por tipo de vehículo	53

Figura 38: Balance total de las emisiones de CO2 en la vida útil de un camión.....	54
Figura 39: Ubicación de los principales elementos de la cadena de tracción diésel.....	55
Figura 41: Posible ubicación de los elementos de la cadena de tracción de hidrógeno	57
Figura 42: Radio de actuación del parque de bomberos de Calatayud	58
Figura 43: Ubicación de las estaciones de servicio, y zonas más alejadas de ellas	59

Índice de tablas

Tabla 1: <i>Tipos de vehículos pesados por tecnología</i>	10
Tabla 2: Listado de turismos comerciales de hidrógeno.....	14
Tabla 3: <i>Listado de camiones comerciales / prototipos de hidrógeno</i>	15
Tabla 4: Especificaciones técnicas de la BUP objeto de estudio	17
Tabla 5: Datos de partida del camión de bomberos	21
Tabla 6: Listado de elementos propios de una cadena de tracción de gasoil.....	22
Tabla 7: Elementos principales de una motorización con pila de hidrógeno.....	23
Tabla 8: Listado de elementos propios de una cadena de tracción de hidrógeno.....	24
Tabla 9: Diseño de los componentes de la cadena de tracción inicial de hidrógeno	24
Tabla 10: <i>Listado de rutas seleccionadas</i>	27
Tabla 11: Eficiencias de cada uno de los elementos que integran las cadenas de tracción.....	28
Tabla 12: Eficiencias de los elementos de la cadena de tracción	29
Tabla 13: Consumos de carburante de las rutas.....	30
Tabla 14: Dimensionamiento de los elementos de la nueva cadena de tracción de hidrógeno..	38
Tabla 15: Comprobación de la autonomía del camión de hidrógeno	41
Tabla 16: Estudio de las licitaciones para camiones de bomberos tipo BUP	43
Tabla 17: Evolución del precio del hidrógeno en los próximos años	45
Tabla 18: Total Cost of Ownership para los camiones ICE y FCEV	46
Tabla 19: Emisiones de CO2 asociadas al proceso de fabricación.	47
Tabla 20: Distribución de pesos en distintos camiones, por componentes.....	48
Tabla 21: Utilización de metales en la fabricación de vehículos (gr).....	49
Tabla 22: Emisiones totales de CO2 en la producción del combustible.....	52
Tabla 23: Principales emisiones contaminantes por la combustión de gasoil en un camión pesado	53
Tabla 24: Balance total de las emisiones de CO2 en la vida útil de un camión.....	54
Tabla 25: Comparación de tamaños para los elementos de las cadenas de tracción	56
Tabla 26: Dimensionado del depósito de combustible en un parque de bomberos	59