



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada
para vehículos de transporte urbano de pasajeros

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Catalá Andrés, Javier

Tutor/a: Tinaut Fluixá, Francisco Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial



Trabajo de Fin de
Grado

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN DESCARBONIZADA PARA VEHÍCULOS DE TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

Grado en Ingeniería Mecánica
Universitat Politècnica de València
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial

Alumno: Javier Catalá Andrés
Tutor: Francisco Vicente Tinaut Fluixá
Curso: 2023/2024

AGRADECIMIENTOS

Antes de entrar en materia, querría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado a conseguir esta meta que tanto he ansiado desde niño.

A mis padres y mi hermana, que han estado ahí desde el inicio del camino, fuesen cuales fuesen las circunstancias, y han sabido levantarme cada vez que me he tropezado con alguna piedra.

A Gema, por aparecer en un momento inmejorable, proporcionarme apoyo día a día, y ayudarme a sacar la mejor versión posible de mí mismo.

A mi tutor Francisco, por su atención y dedicación con el trabajo. Me ha guiado de la mejor forma posible, he aprendido muchas cosas con él y, en definitiva, ha sido un placer realizar este trabajo bajo su tutorización.

A mi grupo de amigos de clase, con los que he acabado viviendo experiencias inolvidables, y sin los cuales no podría imaginarme mi paso por la universidad.

RESUMEN

El CO₂ es el mayor responsable del efecto invernadero, aunque no único. Este gas es producido en la mayoría de las actividades humanas, asociado al consumo de combustibles fósiles y otras actividades. Con el objetivo de contribuir a la mejora de dicha situación, este trabajo pretende comparar las diversas alternativas de propulsión para autobuses urbanos. Aquí se incluyen los sistemas diésel tradicionales, hibridaciones, biocombustibles, gases naturales, sistemas a partir de hidrógeno y eléctricos totales, entre otros. La comparación entre ellos se afronta desde varios niveles: emisiones de CO₂ y consumo de energía en todo el ciclo de vida, tanto del propio autobús como del combustible que lo propulsa; y los costes en los que se incurren al hacer funcionar cada una de las alternativas, incluyendo el propio vehículo, el combustible o energía, el mantenimiento y la posible recuperación de la inversión. Para ello, se utilizan los conceptos de las etapas *Well-to-Tank* y *Tank-to-Wheel*, haciendo uso de los datos de fuentes como el JEC (JRC-Eucar-Concawe) y caracterizando numéricamente los ciclos de homologación de consumos SORT (*Standardized On Road Testcycle*) para autobuses urbanos de la UITP (Unión Internacional del Transporte Público). La finalidad del trabajo es mostrar de forma cuantitativa las características de cada alternativa de propulsión en los aspectos anteriormente mencionados, para poder permitir a un eventual comprador evaluar la conveniencia de cada alternativa, con los costes económicos asociados, permitiendo contribuir a la descarbonización del transporte.

Palabras clave: Transporte urbano de pasajeros; emisiones de CO₂; consumo de energía; consumo de combustible; propulsión eléctrica; e-fuel; hibridación; hidrógeno.

ABSTRACT

CO₂ is the main, but not the only, contributor to the greenhouse effect. This gas is produced in most human activities, associated with the consumption of fossil fuels and other activities. In order to contribute to the improvement of this situation, this work aims to compare the various propulsion alternatives for urban buses. This includes traditional diesel systems, hybridisation, biofuels, natural gases, hydrogen and total electric systems, among others. The comparison between them is approached from several levels: CO₂ emissions and energy consumption throughout the life cycle, both of the bus itself and of the fuel that propels it; and the costs incurred in operating each of the alternatives, including the vehicle itself, the fuel or energy, maintenance and the possible recovery of the investment. The concepts of *Well-to-Tank* and *Tank-to-Wheel* stages are used, making use of data from sources such as the JRC-Eucar-Concawe (JRC-Eucar-Concawe) and numerically characterising the UITP (International Union of Public Transport) SORT (*Standardised On Road Testcycle*) fuel consumption cycles for urban buses. The aim of the work is to show the quantitative characteristics of each propulsion alternative in the above-mentioned aspects, in order to allow a potential buyer to assess the suitability of each alternative, with the aim of contributing to transport decarbonization.

Key words: Passenger urban transport; CO₂ emissions; energy consumption; fuel consumption; electric propulsion; e-fuel; hybridization; hydrogen.

RESUM

El CO₂ és el principal, però no únic, responsable de l'efecte hivernacle. Aquest gas és produït en la majoria d'activitats humanes, associat al consum de combustibles fòssils, entre altres. Amb l'objectiu de contribuir a la millora d'aquesta situació, el present treball pretén comparar les diverses alternatives de propulsió per autobusos urbans. Ací s'inclouen sistemes dièsel tradicionals, hibridacions, biocombustibles, gasos naturals, sistemes a partir d'hidrogen i elèctrics totals, entre altres. La comparació entre ells s'afronta des de diversos nivells: emissions de CO₂ i consum d'energia durant tot el cicle de vida, tant del propi autobús com el combustible que el propulsa; i els costos en els quals s'incorre al fer funcionar cada alternativa, incloent el propi vehicle, el combustible o energia, el manteniment i la possible recuperació de la inversió. Per a això, s'utilitzen els conceptes de les etapes Well-to-Tank i Tank-to-Wheel, fent ús de dades de fonts com el JEC (JRC-Eucar-Concawe) i caracteritzant numèricament els cicles d'homologació de consums SORT (Standardized On Road Testcycle) per autobusos urbans de la UITP (Unió Internacional del Transport Urbà). La finalitat del treball és mostrar de forma quantitativa les característiques de cada alternativa de propulsió als aspectes anteriorment mencionats, per poder permetre a un eventual comprador avaluar la conveniència de cada una, amb els costos econòmics associats, podent així contribuir a la descarbonització del transport.

Paraules clau: Transport urbà de passatgers; emissions de CO₂; consum d'energia; consum de combustible; propulsió elèctrica; e-fuel; hibridació; hidrogen.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	II
RESUM.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
1. Introducción.....	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura del trabajo.....	2
1.4. Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	3
2. Alternativas de propulsión para autobuses urbanos.....	4
2.1. Combinaciones de tecnologías de propulsión con combustibles o energías y su almacenamiento.....	4
2.1.1. MCIA (<i>Motor de Combustión Interna Alternativo</i>) con diésel o biodiésel	5
2.1.2. MCIA con diésel sintético.....	7
2.1.3. MCIA con GN (<i>Gas Natural</i>).....	8
2.1.4. MCIA con biometano.....	8
2.1.5. MCIA con H ₂ puro	9
2.1.6. MCIA con hidrógeno-diésel/GN dual.....	10
2.1.7. Pila de combustible con H ₂	11
2.1.8. Sistema eléctrico a baterías	12
2.1.9. Híbridos en serie y eléctricos de autonomía extendida	12
2.2. Consumos de energía y emisiones de CO ₂ debidas a los procesos energéticos de los combustibles	13
3. Descripción de los autobuses urbanos	16
3.1. Consideraciones generales.....	16
3.2. Autobuses con MCIA diésel, biodiésel o diésel sintético.....	18
3.3. Autobuses con MCIA con GN	19
3.4. Autobús con H ₂ en MCIA	20
3.5. Autobús con pila de combustible de hidrógeno	21
3.6. Autobús eléctrico a baterías.....	22
3.7. Autobús híbrido en serie.....	23

3.8. Recopilación de datos relevantes	23
3.8.1 Consumos de combustible y electricidad	23
3.8.2 Masas de los vehículos en funcionamiento	26
3.8.3 Coste de adquisición	27
4. Variables a considerar para realizar la comparación entre sistemas de propulsión ..	29
4.1. Caracterización de los recorridos diarios	29
4.2. Consumo de energía en rueda necesaria para propulsar un autobús y emisiones tanque a rueda	29
4.3. Consumo de energía y emisiones de pozo a tanque	34
4.4. Características específicas de los sistemas de propulsión.....	38
4.5. Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento	40
4.6. Emisiones de CO ₂ en la fabricación de los autobuses.....	42
5. Resultados obtenidos para cada alternativa de propulsión	44
5.1. Energía consumida por unidad de longitud	44
5.1.1 Energía necesaria en rueda	44
5.1.2 Energía necesaria en tanque.....	47
5.1.3 Rendimiento equivalente del sistema de propulsión de tanque a rueda	48
5.1.4 Energía necesaria para la producción del combustible.....	49
5.1.5 Energía primaria total por unidad de longitud.....	49
5.2. Emisiones de CO ₂ por unidad de longitud	50
5.2.1 Emisiones de CO ₂ directas	50
5.2.2 Emisiones de producción del combustible.....	51
5.2.3 Emisiones de fabricación del autobús.....	52
5.2.4 Emisiones de CO ₂ totales.....	52
5.3. Masas y volúmenes de almacenamiento de cada alternativa.....	53
5.3.1 Masas de los sistemas de almacenamiento.....	53
5.3.2 Volúmenes de los sistemas de almacenamiento.....	54
5.4. Costes de las alternativas de propulsión	55
5.4.1 Coste de combustible/electricidad	55
5.4.2 Coste de mantenimiento.....	56
5.4.3 Coste de amortización	57
5.4.4 Costes totales (TCO, Total Cost of Operation)	58
5.5. Comparación cualitativa de alternativas de propulsión	59
6. Conclusiones	61
Bibliografía	62

PRESUPUESTO	66
-------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Organización de las Naciones Unidas [3].....	3
Figura 2: Esquema de un autobús con MCIA diésel o biodiésel.	7
Figura 3: Esquema de un autobús con MCIA diésel sintético.	7
Figura 4: Esquema de un autobús con MCIA de gas natural.	8
Figura 5: Esquema de un autobús con MCIA de biometano.	9
Figura 6: Esquema de un autobús con MCIA de hidrógeno.	10
Figura 7: Esquema de un autobús con dual-fuel H2-GN.	10
Figura 8: Esquema de un autobús con dual-fuel H2-diésel.	11
Figura 9: Esquema de un autobús con un sistema de pila de combustible.	11
Figura 10: Esquema de un autobús con un sistema eléctrico con baterías.	12
Figura 11: Esquema de un autobús híbrido en serie.	13
Figura 12: Representación de las diferentes energías y denominaciones de los pasos entre ellas.	14
Figura 13: Autobús de 12 metros. Fuente: madridmobilitate [11].....	17
Figura 14: Autobús articulado de 18 metros. Fuente: autobusesyautocares [12].....	17
Figura 15: Mercedes Citaro Hybrid. Fuente: Mercedes-Benz [18].....	19
Figura 16: Irisbus Citelis. Fuente: Iveco Irisbus [20].....	19
Figura 17: Toyota Corolla Cross H2. Fuente: Toyota Labasa [22].....	20
Figura 18: Autobús Keyou. Fuente: Keyou [23].....	21
Figura 19: Caetano H2.City Gold. Fuente: Caetano [24].....	22
Figura 20: Man Lion's City 12e. Fuente: MAN España [26].....	22
Figura 21: Iveco Urbanway Hybrid. Fuente: Iveco Bus [28].....	23
Figura 22: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 1.	31
Figura 23: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 2.	31
Figura 24: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 3.	31
Figura 25: Extracto de la hoja Excel de la simulación del SORT 1.	32
Figura 26: Coeficientes de emisiones de tanque a rueda.	34
Figura 27: Energías de transformación W-t-T.....	35
Figura 28: Coeficientes de emisiones de pozo a tanque.....	36
Figura 29: Porcentajes de orígenes de la energía eléctrica de la REE y emisiones de CO ₂ , extraídos de una factura de Iberdrola.	36
Figura 30: Energía por unidad de longitud necesaria en rueda.	44
Figura 31: Perfiles de potencia en ambas simulaciones para un autobús eléctrico.	46
Figura 32: Perfiles de potencia en ambas simulaciones para un autobús diésel.	46
Figura 33: Energía consumida en tanque.....	47
Figura 34: Rendimientos de los sistemas de propulsión.....	48
Figura 35: Energía necesaria para la fabricación de los combustibles.....	49
Figura 36: Energía primaria consumida por unidad de longitud.....	50
Figura 37: Emisiones de CO ₂ directas.....	51
Figura 38: Emisiones en fabricación del combustible.....	51

Figura 39: Emisiones debidas a la fabricación del autobús.....	52
Figura 40: Emisiones totales.	53
Figura 41: Masas totales de los sistemas de almacenamiento.	54
Figura 42: Volúmenes totales de los sistemas de almacenamiento.	55
Figura 43: Costes de cada combustible.....	56
Figura 44: Coste por km en la vida de cada autobús.	56
Figura 45: Costes de mantenimiento.	57
Figura 46: Costes de amortización.....	58
Figura 47: Coste total de operación.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Combinaciones de tecnologías de propulsión con combustibles/energía.	5
Tabla 2: Recopilación de consumos en ciclos SORT de diversos autobuses.	24
Tabla 3: Consumos simulados de autobús con pila de combustible.	25
Tabla 4: Precios estimados de diversos autobuses.	28
Tabla 5: Trapecios básicos SORT.	30
Tabla 6: Potencia, peso y volumen específicos de diferentes motores.	38
Tabla 7: Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento.	40
Tabla 8: Emisiones de CO2 de los componentes de los sistemas propulsivos.....	42
Tabla 9: Emisiones totales de CO2 de cada alternativa de propulsión.	42
Tabla 10: Valoración cuantitativa en diversos parámetros de cada alternativa.	60
Tabla 11: Coste de mano de obra.	66
Tabla 12: Presupuesto.	66

1. Introducción

1.1. Justificación

En la actualidad, las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros contaminantes, son una preocupación para las masas. Es necesaria una actuación efectiva para minimizar las problemáticas que ya conocemos, concretamente, en el caso de este trabajo, el calentamiento global. En caso contrario, ponemos en juego el bienestar del resto de coetáneos, ya sean presentes o futuros.

El sector del transporte urbano, en concreto el objeto de este trabajo, el del autobús de línea, es muy crítico en este aspecto. En primer lugar, porque tradicionalmente estos vehículos se han propulsado con combustibles fósiles, que son unos de los principales emisores de los citados gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂. En segundo lugar, porque se mueven en entornos urbanos, donde más concentración de emisiones existen y donde más población potencialmente afectada reside, por lo que el efecto perjudicial se maximiza.

Como matiz adicional, ahorrar costes siempre es interesante, pero aún lo es más cuando los vehículos que se tratan en este trabajo suelen ser operados por empresas de transporte públicas. Si a la vez que se reducen las emisiones, se consiguen minimizar los gastos, el beneficio para la población es mayor.

Por estos motivos, este trabajo va a incurrir en un enfrentamiento entre diversas alternativas de propulsión en autobuses, y compararlos tanto a nivel de emisiones como de costes de vida. Para realizar esto, se ha investigado sobre las condiciones de explotación de los vehículos involucrados, y se han recogido en una serie de tablas, siempre verificando los datos en fuentes confiables, ya sean artículos, trabajos, o propios datos propiedad del Instituto CMT (Clean Mobility and Thermofluids) de la Universitat Politècnica de València. Para los cálculos correspondientes, se puede destacar el uso de los conceptos Well-to-Tank (Pozo a Tanque), Tank-to-Wheel (Tanque a Rueda) y Cradle-to-Gravel (Cuna a Tumba).

Cabe mencionar que este trabajo cuenta con una serie de estudios previos, con metodologías y conceptos hermanados pero aplicados a otros vehículos. Estos son *Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos en el Puerto de Valencia* (Chiralt, 2023) [1] y *Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para vehículos de transporte terrestre de mercancías. Proyecto de una metodología para empresas del sector* (Lloret, 2024) [2].

1.2. Objetivos

El **objetivo general** del trabajo es la evaluación de distintas alternativas de propulsión descarbonizada para vehículos de transporte urbano de pasajeros, comparando entre: gasóleo, biodiésel, e-fuel, gasóleo-hidrógeno dual, gas natural comprimido, gas natural-hidrógeno dual, gasóleo-híbrido, eléctrico a batería, pila de combustible con hidrógeno.

Con el fin de cumplir el objetivo general, se han desglosado los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificación de recorridos representativos de las condiciones de servicio (por día, anuales).
- Revisión de los ciclos propuestos por organismos internacionales para autobuses de transporte de pasajeros.
- Cálculo de los consumos de combustibles/electricidad, consumos de energía asociados de Tanque a Rueda y de Pozo a Tanque (*Tank-to-Wheel*, *Well-to-Tank*) y emisiones de CO₂ en las mismas etapas.
- Estimación de pesos y volúmenes de los sistemas de propulsión y del almacenamiento de combustibles o electricidad.
- Comparación de costes totales (TCO) de las distintas alternativas.
- Realización de estudios paramétricos de variables de operación y de optimización de variables de diseño: costes de los combustibles, tamaño y características de las baterías (potencia, energía), de la pila de combustible, del sistema de almacenamiento, etc.

1.3. Estructura del trabajo

El contenido de la memoria de este trabajo está organizado en 7 capítulos. El primero, el presente, ha introducido el trabajo, qué se ha realizado, sus objetivos, y posteriormente la relación con los ODS.

El capítulo 2 muestra qué tipos de sistemas de propulsión existen para autobuses urbanos, su funcionamiento básico y se presenta el funcionamiento de la metodología seguida a la hora de analizar las emisiones y consumos energéticos.

El capítulo 3 presenta modelos concretos de autobuses junto con su marco normativo, y todos los datos que se obtienen de los mismos.

El capítulo 4 detalla las diferentes vías para obtener datos pertenecientes a cada tipo de autobús, con las fuentes y métodos correspondientes.

El capítulo 5 organiza los resultados que se obtienen de los métodos y variables usados en el capítulo anterior, para poder realizar las comparaciones directas entre los sistemas propulsivos.

El capítulo 6 recoge las conclusiones obtenidas de los análisis realizados en todos los capítulos anteriores de la memoria.

Por último, el capítulo 7 constituye la bibliografía, con todas las fuentes que se han necesitado para confeccionar el trabajo.

1.4. Vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los **ODS** (Objetivos de Desarrollo Sostenible) son un conjunto de objetivos globales definidos por la ONU (Organización de las Naciones Unidas) con el propósito de mejorar las previsiones de futuro en todo el mundo. Todos estos están interconectados entre sí, y están diseñados para aplicarse en todas aquellas situaciones críticas que suceden todos los días. Estos objetivos se plantearon para cumplirse antes del año 2030.

Los ODS son los que se muestran en la figura siguiente:



Figura 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Organización de las Naciones Unidas [3]

Si bien todos los objetivos, como se ha mencionado anteriormente, están interconectados, cosa que implica que la actuación en cualquiera de ellos impacta de forma transversal en todos, este trabajo puede relacionarse de forma más evidente con los enumerados a continuación:

- **7: Energía asequible y no contaminante.** Una de las bases del trabajo es el análisis de la limpieza y costes de las diversas alternativas de propulsión, y con ellas de sus fuentes de energía.
- **11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Los autobuses urbanos abundan en las grandes ciudades. Incentivar su reducción de emisiones y costes impacta directamente en la sostenibilidad de las ciudades.
- **12: Producción y consumo responsables.** Relacionado con el objetivo 7, si se obtiene una energía asequible y no contaminante, se puede consumir el servicio tratado sin impactar al medio ambiente ni a la economía de manera irreversible.
- **13: Acción por el clima.** Por último, y recogiendo todos los puntos anteriores, al avanzar hacia la descarbonización de las empresas de transporte se logra un importante beneficio medioambiental.

2. Alternativas de propulsión para autobuses urbanos

2.1. Combinaciones de tecnologías de propulsión con combustibles o energías y su almacenamiento

Podemos valorar múltiples combinaciones de las tecnologías de propulsión con combustibles o fuentes de energía. Para ello, es conveniente definir qué métodos propulsivos consideramos:

- Los motores de combustión interna alternativos (**MCIA**), ya sea con encendido provocado por chispa (MEP) o encendido provocado por compresión (MEC), según el combustible que se utilice. El objetivo es transformar la energía química presente en estos combustibles en energía mecánica.
- Los sistemas de **motor eléctrico con baterías**, que utilizan la electricidad almacenada en las segundas para alimentar y provocar movimiento en el segundo. También se pueden usar varios motores eléctricos, según necesidad.
- Los métodos de **pila de combustible** con motor eléctrico, que se diferencia del sistema del punto anterior en que la energía eléctrica proviene del uso de hidrógeno en la pila de combustible.

Teniendo estos tres métodos propulsivos principales, se pueden establecer distintas combinaciones, denominadas **sistemas híbridos**, que tienen dos modalidades principales: en serie y en paralelo. Los híbridos en serie usan un generador de electricidad, mayoritariamente un motor de combustión, y un motor eléctrico que mueve al vehículo. En sus homólogos en paralelo ambos motores pueden mover al vehículo. Más adelante se detallará más el funcionamiento de estos sistemas.

Con el objetivo de hacer más visible toda esta información, se ha desarrollado una tabla en la que se relacionan los sistemas de propulsión presentados con los combustibles con los que pueden funcionar:

Tabla 1: Combinaciones de tecnologías de propulsión con combustibles/energía.

Combinaciones de Sistemas de Propulsión y Combustibles/Electricidad						
Combustible	Sistema de Propulsión					
	MCIA-MEP	MCIA-MEC	Hibridación paralelo	Hibridación serie	Motor Eléctrico con Batería	Pila Combustible
Diesel	-	1	1.1-1.2	11	-	-
Biodiesel - HVO	-	2.1	2.2	X	-	-
E-Fuel (Diesel)	-	3	X		-	-
Gasolina	X	-	X	X	-	-
Gasolina renov. (Bioetanol)	X	-	X		-	-
E-Fuel (Gasolina)	X	-	X		-	-
GNC	4.1	-	X	X	-	-
GNL	4.2	-	X		-	-
Biometano	5	-	X		-	-
H2	Mix Electric.	6	X	X	-	7.1
	Electr. Renov.	X	X		-	7.2
	Reform. SMR	X	X		-	7.3
H2-GN	Mix Electric.	8	X	X	-	-
H2-Diésel	Mix Electric.	-	9	-	X	-
Electricidad	Mix Electric.	-	-	-	10.1	-
	Electr. Renov.	-	-	-	10.2	-

Leyenda de la Tabla 1:

- Números: Combinaciones consideradas.
- "x": Combinaciones técnicamente posibles, pero no consideradas relevantes.
- "-": Combinaciones no posibles.

Como nota aclaratoria, se ha decidido no incluir los sistemas híbridos en paralelo en un apartado independiente, especialmente en cuanto a redacción. En lugar de esto, se integran dentro de la que se consideraría su "tecnología principal" o "base", es decir, el diésel. En cambio, el híbrido en serie goza de más particularidad técnica, y se ha separado.

2.1.1. MCIA (*Motor de Combustión Interna Alternativo*) con diésel o biodiésel

Esta combinación es la más usada históricamente en el contexto del transporte urbano mediante autobús. El almacenamiento corre a cargo de un depósito tradicional de diésel líquido, que alimenta a un motor de combustión interna alternativo con encendido por compresión.

La gran popularidad de este sistema reside en su **sencillez y bondad de uso** general. Gozan de buena autonomía, las potencias de los motores son altas, la fiabilidad debido a lo contrastado de su desarrollo es alta, repostar es un proceso ágil, entre muchas otras razones.

Adicionalmente, se puede usar biodiésel en lugar de diésel de origen fósil, o una mezcla de ambos en cualquier proporción. Cuanto más favorable sea al biodiésel, más limpia es la solución. La diferencia es que el biodiésel deriva de restos orgánicos. De hecho, según la normativa española sobre combustibles [4], el diésel para turismos que se puede encontrar en las estaciones de servicio españolas contiene un mínimo de 6,5% de biodiésel u otro tipo de combustible renovable compatible. Por ejemplo, en BP [5] se ofrecen diésel B7, con un 7% de biodiésel, B10, con un 10%, y B20 con un 20%.

Híbridos en paralelo y microhíbridos

Este método de propulsión permite el apoyo de la electrificación (hibridación), tanto en serie como en paralelo. No obstante, dentro de este apartado solo vamos a incluir la segunda opción, puesto que es en la que el MCI diésel tiene como apoyo un grupo eléctrico, y no al contrario. En apartados posteriores se explicará la distribución en serie.

Los híbridos en paralelo permiten la propulsión del vehículo tanto mediante el comentado motor diésel, como por un motor eléctrico. De esta forma, la gestión electrónica selecciona cuánto y cuando quiere usar cada uno a conveniencia, cosa que resulta en una mejora de la eficiencia. Según el protagonismo que tenga la parte eléctrica, se pueden diferenciar los híbridos de los microhíbridos.

Tal y como explican Benajes et. al. [6] los microhíbridos o *Mild Hybrid* son en esencia sistemas de motor térmico convencionales a los que se sustituye el motor de arranque por un motor eléctrico más potente, con el objetivo de asistir al MCI diésel en las fases de baja eficiencia, como altas cargas o transitorios. La energía para alimentar a este motor proviene de las frenadas, y se suelen almacenar en pequeñas baterías o supercapacitores que se descargan en el acto. Es una hibridación sencilla en cuanto a aplicación, y los fabricantes de autobuses suelen ofrecerla como equipamiento opcional sobre un modelo diésel, más que como una motorización separada. Como se explica en el mismo artículo, las ganancias en cuanto a eficiencia son efectivamente menores que en un híbrido propiamente dicho.

En cambio, los híbridos en paralelo convencionales tienen la potencia más repartida entre ambos tipos de motor, pueden incluso circular exclusivamente en modo eléctrico, y algunos incluso requieren que sus baterías sean cargadas de forma externa, si bien no tiene por qué ser así. Por el contrario, la complejidad mecánica es mucho mayor que las de los microhíbridos, ya que ambos motores mueven el vehículo y esto tiene que ser gestionado con embragues, diferenciales y la propia caja de cambios, para ofrecer una experiencia suave.

A continuación, se adjunta un esquema explicativo a nivel gráfico de este tipo de sistemas:

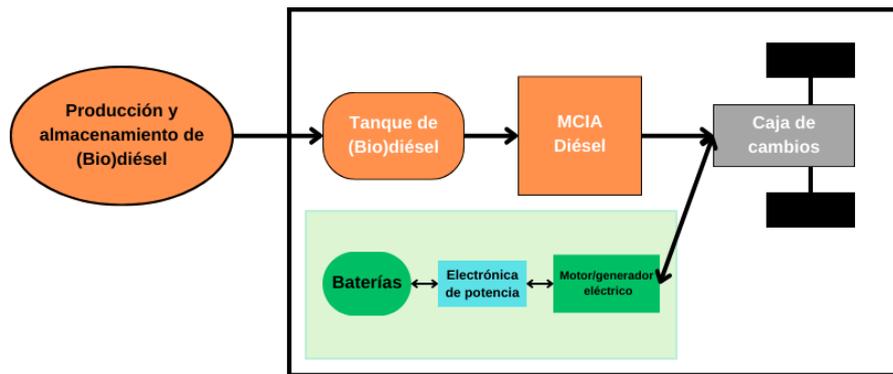


Figura 2: Esquema de un autobús con MCIA diésel o biodiésel.

2.1.2. MCIA con diésel sintético

Fundamentalmente, este sistema es exactamente igual al del apartado anterior en cuanto a funcionamiento, pero la diferencia reside en el combustible usado. Cambiamos diésel convencional o biodiésel con **combustible totalmente sintético**. Se conserva la compatibilidad con hibridación, pero debido a ser un combustible neutro en carbono, pierde cierto interés.

Los combustibles sintéticos (e-fuel) se obtienen mediante la síntesis de moléculas de carbono provenientes del CO₂ atmosférico y de hidrógeno de moléculas de agua (H₂O), en un proceso que requiere de electricidad. Según la aplicación objetivo, del proceso de síntesis citado resulta un combustible con propiedades similares a la gasolina o, como es el caso de los autobuses de línea urbanos, al diésel.

De este modo, el autobús continúa emitiendo dióxido de carbono a la atmósfera en su funcionamiento, pero es exactamente el que se ha retirado del mismo medio al desarrollar el combustible. Por tanto, la limpieza de este combustible depende del origen de la electricidad usada en el proceso, que idealmente debe ser renovable.

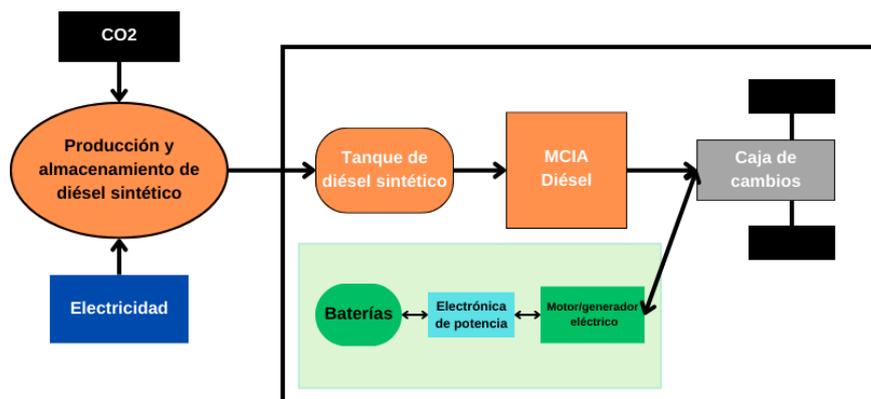


Figura 3: Esquema de un autobús con MCIA diésel sintético.

2.1.3. MCIA con GN (*Gas Natural*)

Este método de propulsión usa un motor de combustión cuyo combustible es gas natural, un gas obtenido en el proceso de extracción del petróleo. Resulta relativamente económico, y su combustión es menos contaminante que la del diésel. Su composición es, principalmente, a base de **metano**. La diferencia en el motor está en su encendido, que en este caso es provocado con chispa, al igual que en un motor de gasolina convencional.

El GNC y el GNL son, en cuanto a composición, totalmente idénticos, pero difieren en su almacenamiento. El GNC (Gas Natural Comprimido) se presuriza sin cambiar de estado para posteriormente almacenarlo. Mantener el estado gaseoso provoca que la densidad energética comparada con el diésel sea menor. El GNL, sin embargo, se lleva a estado líquido a muy bajas temperaturas, pero a presión atmosférica. En transportes urbanos, se usa el GNC por la facilidad del repostaje. El GNL tiene más densidad energética, pero su repostaje exige unas medidas de seguridad mucho más estrictas, y en un autobús urbano puede ser necesario un abastecimiento rápido para seguir un turno posterior. Por ello, es el tipo de Gas Natural que vamos a considerar.

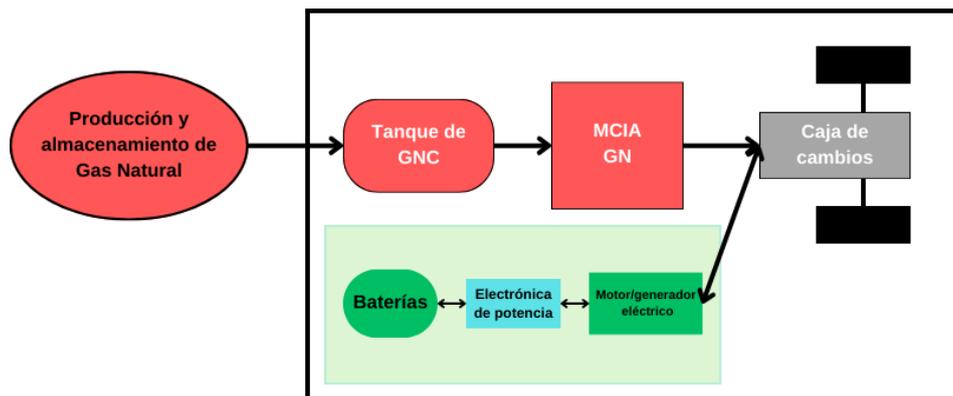


Figura 4: Esquema de un autobús con MCIA de gas natural.

2.1.4. MCIA con biometano

En cierto modo, está estrechamente emparentado con los métodos anteriores. El biometano es un gas compuesto en un 95% por metano, al igual que el gas natural. Su factor diferencial es que su origen es renovable. Además, al compararlo con el diésel tradicional, resulta menos contaminante, tal y como ocurría con el gas natural, por el menor contenido en carbono en cada molécula (CH_4 contra -generalmente- $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$). Al igual que todos los métodos anteriores, es compatible con hibridación. No obstante, no resulta tan interesante debido a que el propio biometano ya es renovable.

El biometano se obtiene a partir del biogás. El biogás es el gas resultante de la descomposición de **residuos orgánicos** bajo una digestión carente de oxígeno, con el uso de bacterias, tal y como sucede en un compostaje. El biogás tiene como componentes principales el metano y el dióxido de carbono. Tras eliminar la mayor parte de CO_2 (entre otras impurezas) un proceso llamado depuración, el producto final es el denominado biometano.

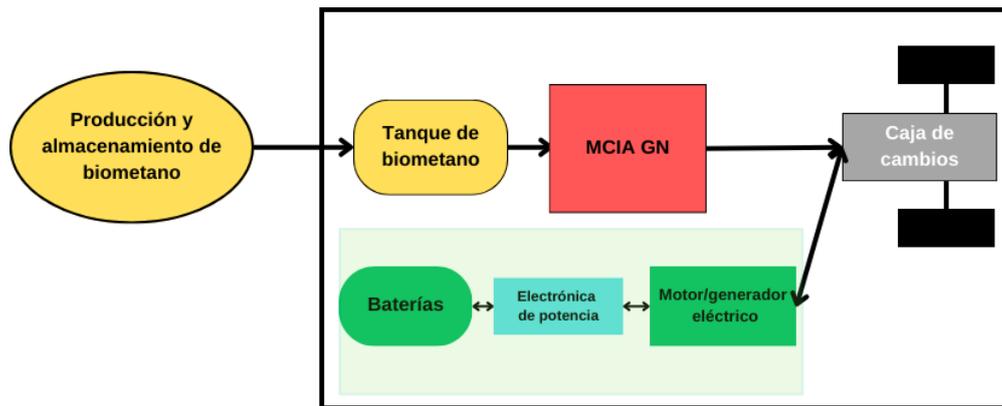


Figura 5: Esquema de un autobús con MCIA de biometano.

2.1.5. MCIA con H₂ puro

Este tipo de motores, al igual que los de gasolina o GN (y derivados) son de tipo MEP. Como el motor se alimenta con **hidrógeno puro**, sin existencia de ninguna molécula de carbono, es imposible la emisión de dióxido de carbono en su funcionamiento.

En cuanto al almacenamiento, este se produce en estado gaseoso, a alta presión (350 bares), licuado, pero con necesidad de gasificarse antes de la combustión, o ubicado en otros compuestos que actúan como vectores, para extraerlo antes de necesitarlo. La opción más usada actualmente es la primera.

El hidrógeno se puede obtener por dos vías principales. La primera es la electrólisis, que tiene como componentes básicos el agua y la electricidad. La limpieza del proceso depende del origen de esta última. La segunda es el reformado por vapor de agua. Este proceso usa dicho vapor para hacerlo reaccionar con hidrocarburos, usualmente metano, para obtener, entre otros elementos, H₂.

La hibridación, como se viene repitiendo, es compatible, pero su utilidad se pone más en entredicho. Se suele apostar más por la limpieza del propio hidrógeno, porque así se conserva la simplicidad del sistema de propulsión.

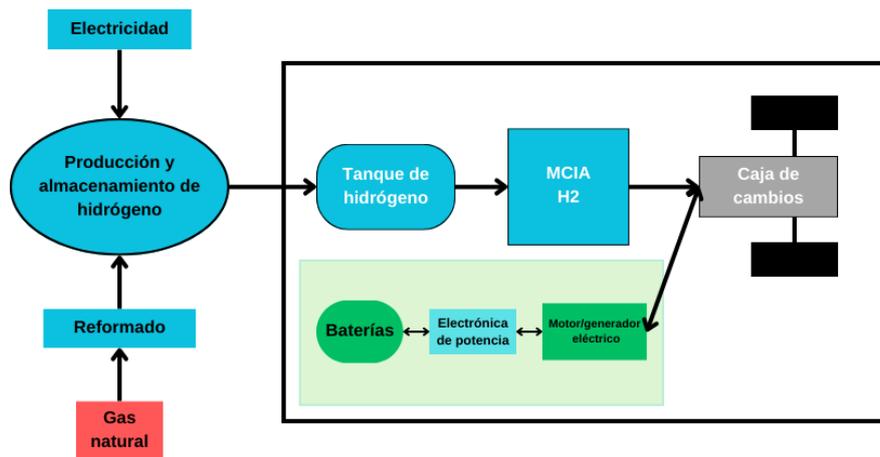


Figura 6: Esquema de un autobús con MCIA de hidrógeno.

2.1.6. MCIA con hidrógeno-diésel/GN dual

Estos motores funcionan con una **mezcla de dos combustibles** a la vez, en una proporción variable. Usualmente, se usa un 30% de hidrógeno. Según si el combustible mayoritario es diésel o gas natural, el motor es de encendido por compresión (primer caso) o provocado (segundo caso).

De esta forma, lo que se consigue es que los motores actuales que funcionan con diésel o GN puedan beneficiarse de la limpieza del hidrógeno puro sin sufrir grandes cambios. En las comparaciones de este trabajo, se considera en este tipo de casos que el hidrógeno es de origen renovable, por lo que es totalmente limpio.

Es posible hibridar estos motores, y en este caso a nivel de emisiones sí puede ser interesante porque se usa diésel o GN, pero no se ha considerado por otra problemática: el espacio. Cuenta con dos depósitos, al fin y al cabo, en el caso del diésel; y uno solo, en el caso del GN. Pero, en este último sistema se pierde capacidad de almacenamiento porque la densidad del hidrógeno es menor que la del GNC.

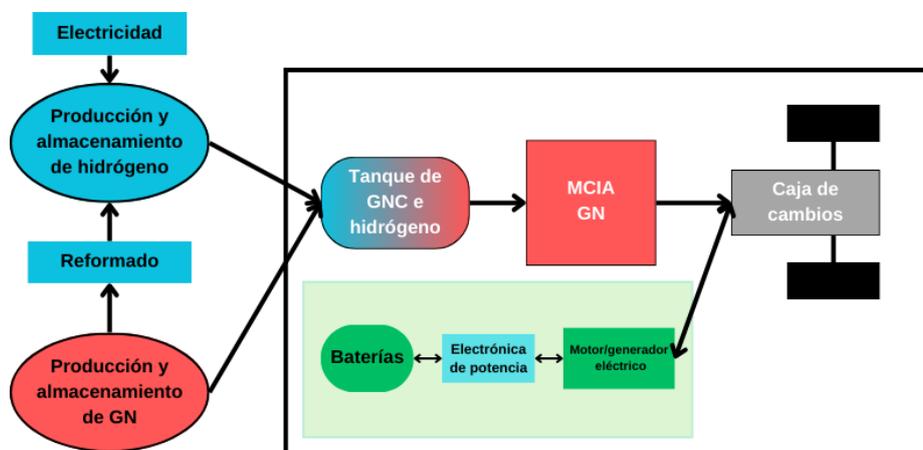


Figura 7: Esquema de un autobús con dual-fuel H2-GN.

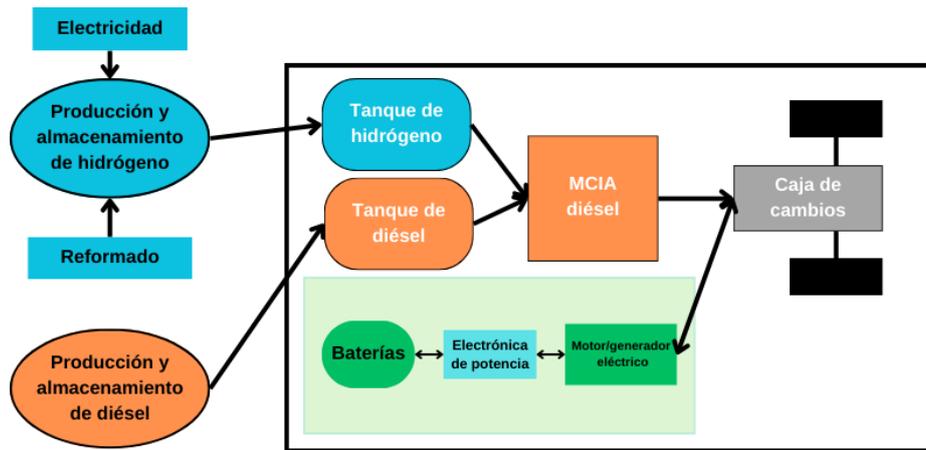


Figura 8: Esquema de un autobús con dual-fuel H2-diésel.

2.1.7. Pila de combustible con H₂

Tal y como se detalla en el Centro Nacional del Hidrógeno [7] “una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (en muchos casos oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor”.

El calor y el agua son, generalmente, expulsados del vehículo, y la electricidad se utiliza en un **motor eléctrico** para propulsar al autobús. Estos vehículos cuentan además con una batería que sirve como búfer de electricidad. Las pilas de combustible aún no han alcanzado una sofisticación suficiente como para hacer frente a las variaciones de carga que requieren los transportes urbanos, que apenas tienen fases de estabilidad. Dichas baterías acumulan energía, proveniente de las frenadas y de la propia pila, para después enviarla al motor en fases en las que la pila no suministra suficiente electricidad.

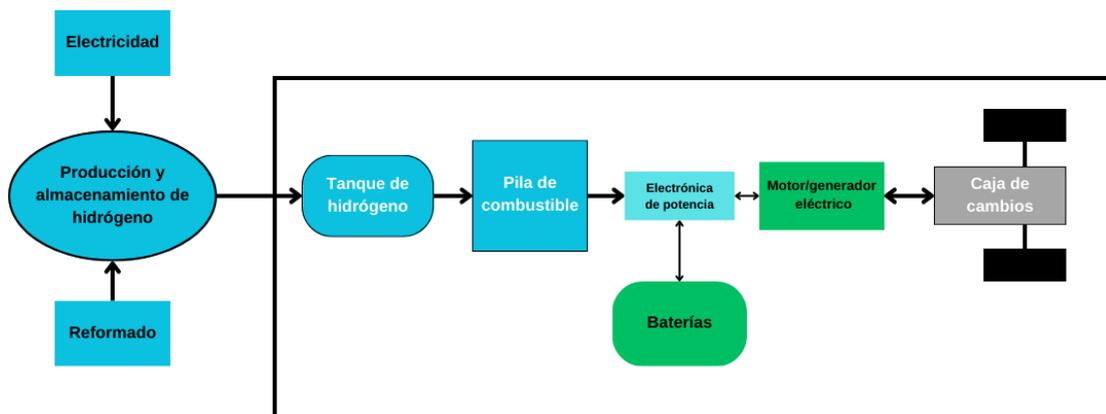


Figura 9: Esquema de un autobús con un sistema de pila de combustible.

2.1.8. Sistema eléctrico a baterías

Este sistema, tal y como indica su nombre, almacena la energía eléctrica en unas **baterías**, para usarla en uno o varios motores eléctricos encargados en la propulsión del autobús. Las baterías pueden tener diversas químicas en cuanto a constitución, pero las más comunes son las de iones de litio, y en el pasado fueron muy usadas las de níquel-hidruro metálico, especialmente por Toyota.

En cuanto a emisiones en su uso, la dependencia es evidentemente sobre el origen de la electricidad con la que se carguen las baterías. Una electricidad 100% renovable es más limpia que la proveniente del mix eléctrico español.

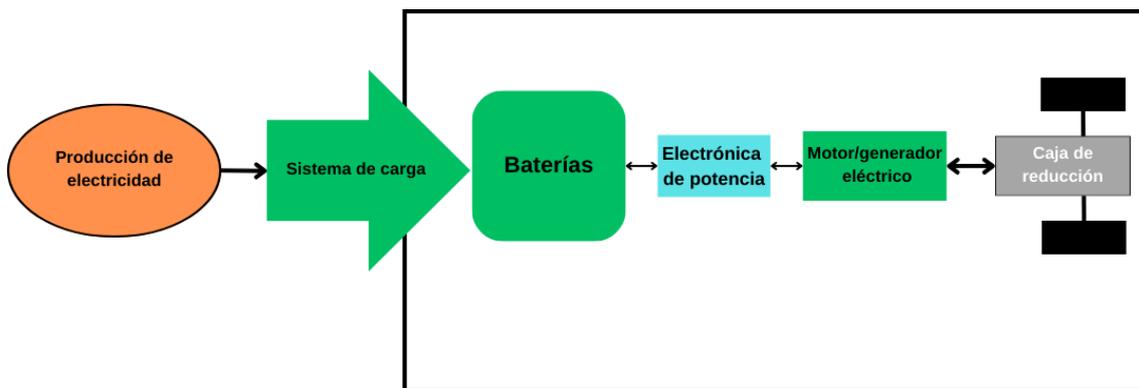


Figura 10: Esquema de un autobús con un sistema eléctrico con baterías.

2.1.9. Híbridos en serie y eléctricos de autonomía extendida

El último método de propulsión a presentar es el híbrido en serie. En este tipo de híbridos tienen baterías y los **motores eléctricos como propulsores del vehículo**, pero tienen un MCI (podría ser del combustible que sea, pero usualmente es diésel para aprovechar su accesibilidad, precio y fiabilidad) actuando como **generador de energía eléctrica**. En ningún momento mueve las ruedas, solo carga la batería o suministra corriente directamente al sistema propulsivo. Si bien no está regulado, se suele referir como híbrido en serie a aquellos con una batería más bien compacta, usualmente no enchufable, y que son más dependientes energéticamente de la aportación del motor de combustión. En cambio, se denominan eléctricos de autonomía extendida aquellos que fundamentalmente son vehículos eléctricos, con sus baterías recargables de capacidad alta, y que tienen un pequeño generador de combustión que se enciende en casos de necesidad.

Sea como fuere, en ambos la clave reside en hacer funcionar al motor de combustión en su **zona de máximo rendimiento** (y por tanto mínimo consumo), ya que no tiene que hacer frente a los transitorios propios de la conducción. Sólo en aquellos híbridos con menos batería, y muy dependientes de la generación del MCI, puede ser necesario aumentar el régimen para no quedarse sin energía. En cambio, en los eléctricos de autonomía extendida, el generador suele tener un régimen fijo, y se va encendiendo y apagando. De esta forma se mitiga uno de los grandes contras de este tipo de motores, que es la baja eficiencia al trabajar en múltiples zonas de funcionamiento y transitorios.

Este tipo de hibridación no es tan popular en transportes urbanos. A principios de la década de los 2010, surgieron unos cuantos modelos, pero actualmente las marcas que lo hicieron apuestan más por los microhíbridos, que son la opción más sencilla y económica de hibridar un autobús. No obstante, Iveco sigue apostando por esta tecnología.

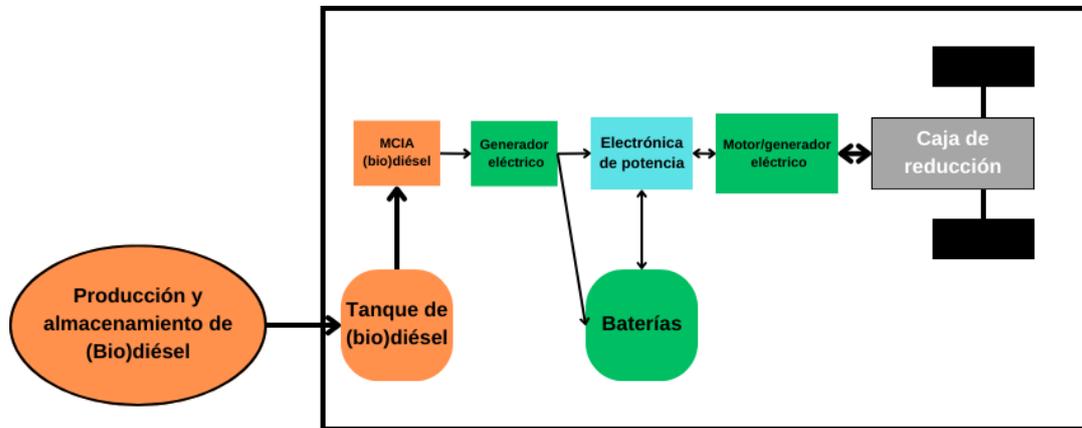


Figura 11: Esquema de un autobús híbrido en serie.

2.2. Consumos de energía y emisiones de CO₂ debidas a los procesos energéticos de los combustibles

En este capítulo se va a hacer uso de los conceptos **Well-to-Tank** (Pozo a Tanque) y **Tank-to-Wheel** (Tanque a Rueda) previamente planteados en los trabajos de Chiralt [1] y Lloret [2], recogida a su vez en el *JEC Well-To-Wheels report v5* [8], cuya metodología se usará más profundamente en capítulos posteriores, y se explica con detalle en los apuntes del Máster en Ingeniería de Automoción de Tinaut [9].

Con el objetivo de que el autobús pueda avanzar, se tienen que superar dos resistencias principales: la resistencia a la rodadura producida por la interacción entre las ruedas y el asfalto, y la resistencia aerodinámica.

Para poder caracterizar las necesidades energéticas, se parte de la energía necesaria en las ruedas, ya que son el punto último donde se aplican las fuerzas motrices y las que conectan el vehículo con el medio. Sabiendo esta fuerza, y el rendimiento del conjunto de elementos de la transmisión, se obtiene la energía a suministrar por el sistema de propulsión, es decir el motor, ya sea térmico, eléctrico, o incluso ambos. Por último, al aplicar el rendimiento del motor, el resultado es la energía necesaria en el tanque (entendiendo como tanque el lugar donde se almacene la energía, puede ser una batería). La diferencia entre la energía necesaria en rueda y en tanque constituye el rendimiento *Tank-to-Wheel* (η_{TTW}). Además, cuantificando estos procesos también se obtienen las emisiones de CO₂ directas, las que se producen en el mismo funcionamiento del vehículo.

Con esto, el vehículo queda definido energéticamente, pero falta hacer lo propio con el combustible o energía que lo haga funcionar. Estas fuentes de energía requieren de un

conjunto de transformaciones para poder utilizarse. Estas transformaciones tienen unos rendimientos y emisiones asociados. Todo esto se engloba en un rendimiento llamado *Well-to-Tank* (η_{WT}), además de asociar las emisiones correspondientes a cada proceso. Al juntar las transformaciones ocurridas en el vehículo con las ocurridas hasta el repostaje, se obtiene el consumo total de energía primaria (extraída de la naturaleza) y sus emisiones de CO₂ a lo largo de todo el proceso.

Con el objetivo de hacer esta explicación más visual, se presenta un esquema con base en el ejemplo de la Figura 2, correspondiente al gráfico del MCIA alimentado por diésel:

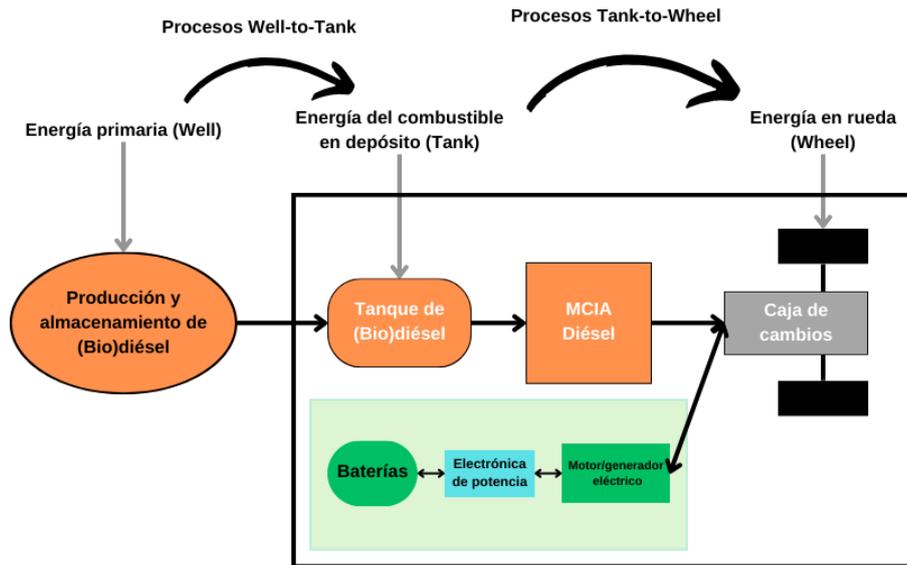


Figura 12: Representación de las diferentes energías y denominaciones de los pasos entre ellas.

La forma más óptima de cuantificar estas energías es al usarlas como Energía por unidad de longitud (E/L), ya que de esta forma son muy visibles las diferencias en el uso del vehículo, ya que el kilometraje es, al fin y al cabo, la representación de esto último. No obstante, esa energía por unidad de longitud es dependiente de parámetros como velocidad y masa (términos de la energía cinética), por un lado, y de las características del terreno y el ambiente, por otro, por lo que los valores obtenidos dependen de las condiciones de contorno concretas.

A continuación, se van a detallar las ecuaciones correspondientes a los procesos descritos en los anteriores párrafos. Se recuerda que el punto de partida es la energía necesaria en las ruedas, concretamente la energía por unidad de longitud.

$$\left(\frac{E}{L}\right)_{\text{Tanque (Tank)}} = \frac{\left(\frac{E}{L}\right)_{\text{Rueda (Wheel)}}}{\eta_{TtW}} \quad \left[Wh/km \text{ ó } J/km\right]$$

Nota: Por nuestro tipo de aplicación, lo más conveniente es que la longitud se exprese en km.

$$\left(\frac{E}{L}\right)_{\text{Primaria (Well)}} = \frac{\left(\frac{E}{L}\right)_{\text{Tanque (Tank)}}}{\eta_{WT}} = \frac{\left(\frac{E}{L}\right)_{\text{Rueda (Wheel)}}}{\eta_{TtW} * \eta_{WT}} \quad \left[Wh/km \text{ ó } J/km\right]$$

Cuando se conocen estas energías, se puede pasar a calcular las emisiones de CO₂. Se empieza por las emisiones directas, las que suceden en el funcionamiento propio del autobús:

$$\left(E^{CO_2/L} \right)_{TtW} \left[g/km \right] = eCO_{2TtW} \left[g/Wh Tank \right] * \left(E/L \right)_{Tank} \left[Wh/km \right]$$

Como se puede apreciar, la metodología para calcular dichas emisiones consiste en el uso de coeficientes de emisión (eCO₂) que se aplican sobre la energía de combustible utilizada, que es más sencilla de calcular. Como ejemplo, este coeficiente de emisiones directas es nulo en eléctricos puros, sistemas de hidrógeno y combustibles renovables, como el biodiésel, e-fuel o el biometano. En el caso de los dos primeros, porque no emiten CO₂ y en el caso de los segundos, porque el CO₂ que emiten se ha utilizado en su proceso de fabricación, o es de origen renovable, como residuos orgánicos.

En cuanto a las emisiones correspondientes a los procesos de producción de la energía (o combustible) que va al tanque (*Well-to-Tank*), se realiza de la misma forma que las emisiones directas:

$$\left(E^{CO_2/L} \right)_{WtT} \left[g/km \right] = eCO_{2WtT} \left[g/Wh Tank \right] * \left(E/L \right)_{Tank} \left[Wh/km \right]$$

Como se puede apreciar, la diferencia en la operación reside en el coeficiente de emisiones utilizado, que pasa de *Tank-to-Wheel* a *Well-to-Tank*. En este caso, solo la electricidad de origen 100% renovable tiene un coeficiente de emisión de 0. Todos los demás, en algún momento de la producción, emiten una cierta cantidad de gases. Finalmente, las emisiones totales de CO₂, es decir, el proceso *Well-to-Wheel*, no es más que la suma de las dos últimas operaciones:

$$\left(E^{CO_2/L} \right)_{WtW} \left[g/km \right] = \left(E^{CO_2/L} \right)_{WtT} + \left(E^{CO_2/L} \right)_{TtW}$$

Estos coeficientes vienen recogidos en el documento *JEC Well-To-Wheels report v5* [8], concretamente en el apartado *Resultados* situado en el *Anexo 1*. La última versión de este informe data de 2020, y es la que ha sido objeto de consulta en el caso de este trabajo.

3. Descripción de los autobuses urbanos

3.1. Consideraciones generales

Para empezar, cabe matizar que, aunque en el presente trabajo hablamos de autobuses urbanos, debido a que así se le refiere en el ámbito general, en el Artículo 4 de la Ley 1/2014, del 17 de noviembre presente en el BOE [10] se detalla como transporte urbano aquel que solo cubre un solo municipio, y el interurbano aquel que sí cubre más de un municipio. En el caso de la EMT de València, por ejemplo, hay líneas que se ciñen estrictamente al entorno de la ciudad, pero hay algunas otras que sí llegan a entrar en municipios cercanos como Burjassot o Alfafar.

Continuando la lectura de la misma ley, se puede catalogar al servicio de la mencionada empresa como un transporte regular, porque se rige con unos itinerarios (líneas) fijos y con unos horarios constantes, y permanente, porque tiene un carácter continuo. Por último, es de tipo general porque puede ser utilizado por todo el mundo y no va dirigido a un grupo específico como podrían ser los casos de los autobuses escolares.

En cuanto a los propios autobuses (*coches*, en el argot del sector), existen dos tipos mayoritarios: los **autobuses estándar**, que suelen medir unos 12 metros de longitud, entre 2,5 y 2,8 metros de ancho y 3 metros de alto, y cuentan con capacidad para unas 100 personas aproximadamente; y los **autobuses "articulados"** que miden unos 18 metros de longitud, y llegan a las 150 personas de capacidad. Son básicamente autobuses convencionales de 12 metros a los que se les añade un apéndice con un eje propio, y una parte elástica que los une, de forma que actúa como una especie de remolque.

También hay **microbuses**, que son más pequeños y tienen sobre unas 20 plazas, pero suelen ser modificaciones con base de furgones de gran tamaño, y son menos frecuentes en ciudades grandes.



Figura 13: Autobús de 12 metros. Fuente: madridmobilite [11]



Figura 14: Autobús articulado de 18 metros. Fuente: autobusesyautocares [12]

Una vez conocida la morfología de los autobuses, se pasa a comentar su marco normativo. Tal y como se puede encontrar en documentos de Mapfre [13] y en el Ministerio de Transportes [14], estos **autobuses urbanos** están en la **categoría M3**, correspondiente a vehículos destinados al transporte de pasajeros, con capacidad para más de ocho de ellos y MMA (Masa Máxima Autorizada, la suma de la masa propia del vehículo y todo su contenido en el interior, ya sean pasajeros, equipaje o, si fuese el caso, mercancía) superior a 5 toneladas. En cuanto a su capacidad, los ubica como autobuses de 2 ejes de Clase I, por su carácter urbano, amplitud de sus zonas para viajar de pie, y MMA de 20 toneladas, en el caso de los autobuses estándar de 12 metros de longitud. Los autobuses de 3 ejes articulados ven su MMA ampliada a 28 toneladas. Si bien se ha dicho anteriormente que en la EMT algunas líneas van más allá del territorio municipal valenciano, el carácter y tipología de los autobuses sigue siendo urbano, por la cercanía de los municipios a los que cubre.

En los siguientes capítulos, a título informativo y de manera breve, se va a presentar un ejemplo real de autobús con cada combinación de sistema de propulsión y combustible, si es que existe. Siempre que sea posible, se van a nombrar los ejemplos concretos de la EMT de València, cuyos últimos datos públicos de flota datan de 2022 [15] y [16].

3.2. Autobuses con MCIA diésel, biodiésel o diésel sintético

Uno de los modelos más recientes en la EMT con MCIA sin hibridación, y del que más información se puede encontrar, es el Mercedes Citaro Euro 6 [17]. Existe en versiones de 220 y 260 kW (295 y 350 CV respectivamente), ambas con el mismo motor OM 936h, de 7,7 litros de cilindrada.

Este modelo, además, tiene un pequeño sistema microhíbrido disponible como equipamiento opcional sobre la versión diésel convencional [18]. Al equiparlo, el vehículo pasa a denominarse Citaro Hybrid, y cuenta con un sistema de acumulación de energía mediante supercondensadores ubicado en el techo, con capacidad para almacenar unos 48 Wh estimados, y un motor eléctrico de 14 kW encargado de recuperar energía en las frenadas y apoyar al motor de combustión en aceleraciones y transitorios.

Las marcas no suelen proporcionar datos oficiales de consumos medios, pero se puede estimar. Según un ciclo de homologación realizado por un laboratorio, que ha sido proporcionado por el CMT, y siguiendo las pautas de los ciclos SORT (*Standardized On Road Testcycle*) de la UITP (Unión Internacional del Transporte Público) que se detallarán en capítulos posteriores [19], el consumo del Mercedes Citaro Hybrid es de 38,22 l/100 km en entorno urbano con tráfico denso, 33,43 l/100 km en el mismo entorno pero con tráfico ligero, y de 31,35 l/100 km en interurbano. Según la propia Mercedes, el ahorro de consumo con el sistema híbrido es de un 8,5%. Aplicando este factor, el consumo del Citaro convencional sería de 41,47 l/100 km, 36,27 l/100 km y 34 l/100 km respectivamente. Efectivamente, se deberían de analizar ambos modelos por separado, pero es útil tener estas estimaciones preliminares.



Figura 15: Mercedes Citaro Hybrid. Fuente: Mercedes-Benz [18]

3.3. Autobuses con MCIA con GN

Desde hace bastantes años, en la EMT se ha dejado de comprar autobuses con gas natural, en favor de soluciones híbridas y eléctricas. No en vano, el modelo más reciente de este tipo en flota es el Irisbus Citelis GNC [20], con una edad media de 12,58 años en 2022. Este modelo monta el motor Cursor 8 de Iveco, con 7,8 litros de cilindrada, y se ofrece en potencias de 245 y 290 CV para los 12 metros de longitud.

El grupo Iveco, al que pertenece Irisbus, es muy reservado en cuanto a la información pública de sus autobuses. Sin ir más lejos, su página web de especificaciones requiere introducir unas credenciales privadas. No obstante, en la EMT existen datos del Irisbus Cityclass GNC, el antecesor del Citelis, y se puede ver que consta de 8 depósitos de 140 litros de gas natural comprimido en el techo, fabricados en acero y fibra de vidrio. El motor tiene 240 CV, es el mismo Cursor 8 que se lleva usando desde finales de los 90. Tampoco hay datos en cuanto a su consumo, pero según datos del CMT, un autobús urbano con GNC debería ubicarse entre los 55 y 60 kg/100 km.



Figura 16: Irisbus Citelis. Fuente: Iveco Irisbus [20]

Cabe señalar que en este trabajo los autobuses propulsados con MCIA con combustibles duales de hidrógeno y gas natural, o hidrógeno y diésel se consideran similares al autobús que tiene el combustible original (gas natural, diésel). En el caso de que el autobús original sea de gas natural, se incluye hidrógeno en la mezcla de gas natural,

mientras que si es diésel, se instala un depósito auxiliar, pero el autobús es el mismo. Además, en general se trata de una adaptación independiente, y no de algo que vendan los fabricantes.

3.4. Autobús con H₂ en MCIA

En estos momentos, en la EMT no hay ningún autobús propulsado por hidrógeno. Pero, además, no se conoce ningún autobús de producción que utilice este combustible gaseoso en un motor de combustión.

Como referencias en otros tipos de vehículos, cabe mencionar al Toyota GR Corolla H2 [21], que participó en la serie *SuperTaikyu*, una serie de resistencia japonesa en la que una de las categorías integra coches de serie con pequeñas modificaciones, la más similar a este GR Corolla, aunque sea un prototipo experimental.

En este caso, el hidrógeno se almacena en estado líquido, a diferencia de una primera versión que lo hizo en gaseoso. La temperatura en el llenado y almacenamiento debe ser inferior a -253 °C, a apenas 20 grados del 0 absoluto. Por otro lado, se evita tener que presurizar el hidrógeno. El motor en sí sigue siendo el mismo 1,6 litros de tres cilindros que monta el GR Corolla de producción, con unas adaptaciones para el caso.

El mayor problema del vehículo fue la autonomía, aproximadamente la mitad de la del resto de integrantes de la categoría de serie. En cuanto a velocidad, sí era competitivo.

Posteriormente, se lanzó con la misma tecnología el Toyota Corolla Cross H2 Concept [22], el primer coche con combustión de hidrógeno con un enfoque civilizado. Utiliza el motor del GR Corolla H2, pero más optimizado para la conducción en la calle.



Figura 17: Toyota Corolla Cross H2. Fuente: Toyota Labasa [22]

La empresa Keyou [23] tiene un prototipo de autobús urbano con MCIA alimentado por hidrógeno. Es un único prototipo, con una conversión tomando la base de un motor diésel de 7,8 litros. El motor desarrolla 210 kW y el almacenamiento del hidrógeno corre

a cargo de unos depósitos de 27 kg de capacidad a 350 bares de presión. En automoción son más frecuentes los 700 bares, por la problemática del espacio, o incluso licuarlo, como el caso del primer prototipo de este apartado. La autonomía estimada es de 350 km en el prototipo, aunque la empresa declara que se podría llegar a 600 km si se optimiza todo el espacio disponible. El consumo estimado declarado es de 7,5 kg/100 km. Repostar consume 15 minutos de tiempo. Cabe apuntar que toda la información presente para esta empresa es más difusa y carece de grandes pruebas empíricas, a diferencia de Toyota, que ha exhibido sus avances incluso en competición, dejando ver sus fortalezas y debilidades.



Figura 18: Autobús Keyou. Fuente: Keyou [23]

3.5. Autobús con pila de combustible de hidrógeno

Como se ha dicho anteriormente, la EMT no dispone de autobuses cuyo combustible sea el hidrógeno. Sin embargo, sí que existen autobuses con pila de combustible, y son utilizados en otras empresas de transporte.

El ejemplo representativo que se considera es el de Caetano, el H2.City Gold [24]. Este autobús consta de pilas de combustible desarrolladas por Toyota en el techo, con una potencia de 60 kW, que se alimentan del hidrógeno ubicado en los tanques, en la parte posterior del mismo techo. Además, tiene una serie de baterías búfer con una capacidad de 44 kWh en la versión de 12 metros. Todo esto alimenta un motor eléctrico Siemens de 180 kW de potencia ubicado en el eje trasero.

La capacidad en cuanto a pasajeros en el caso de la versión de 12 metros de longitud es de 87, algo menor que en las tecnologías más convencionales. En cuanto al consumo, Caetano declara un mínimo de 6 kg de H₂ a los 100 km. Es un valor algo optimista pero no descabellado, puesto que en el estudio realizado por Caponi et al. [25] obtienen este tipo de autobuses una media de 7 kg/100 km. La autonomía estimada es de unos 400 km.



Figura 19: Caetano H2.City Gold. Fuente: Caetano [24]

3.6. Autobús eléctrico a baterías

La EMT sí tiene autobuses completamente eléctricos en su flota. El más nuevo de ellos es el Man Lion's City 12e [26], modelo del cual se adquirieron 20 unidades en 2023. Ya tenían dos modelos anteriormente, pero solo una unidad de cada uno, más bien a modo de prueba.

El Man tiene una batería de hasta 480 kWh, que permite a este autobús recorrer unos 350 km, aunque la marca asegura que en entorno estrictamente urbano y con el modo más restrictivo de entrega de potencia, se puede llegar a los 550 km, también ayudado por la regeneración de energía con el sistema de frenos. Dividiendo la capacidad de la batería entre la autonomía, podemos estimar unos 137,14 kWh/100 km. En el ciclo SORT realizado para este autobús [27], los consumos son de 82,3 kWh/100 km en SORT 1, 75,6 kWh/100 km en SORT 2 y 73,8 kWh/100 km en SORT 3. La potencia del motor es de 160 kW en entrega continua, aunque puede alcanzar picos de 240 kW.



Figura 20: Man Lion's City 12e. Fuente: MAN España [26]

3.7. Autobús híbrido en serie

Los autobuses híbridos en serie, como se ha detallado en apartados anteriores, son tecnológicamente muy similares a los eléctricos en cuanto a propulsión, pero ayudados por un motor de combustión interna. Por ejemplo, el Iveco Urbanway Hybrid [28]. Por debajo de 20 km/h estos autobuses funcionan igual que un eléctrico. Al sobrepasar esta velocidad, el MCI A Tector 7 de 6,7 litros se enciende, pero no para mover al vehículo, sino para generar energía eléctrica, a través del generador eléctrico de 140 kW. El encargado de la propulsión sigue siendo el motor eléctrico, de 120 kW de potencia constante y 175 de pico. El ahorro de consumo respecto a un diésel convencional se ubica en el 40% en entorno estrictamente urbano según el fabricante. En este caso, la capacidad de la batería no es suficiente para propulsar al vehículo en grandes distancias, y la mayor parte del tiempo el motor de combustión produce energía de forma prácticamente constante, y se va consumiendo en el motor eléctrico. La pequeña reserva de la batería se utiliza en las proximidades de las paradas.



Figura 21: Iveco Urbanway Hybrid. Fuente: Iveco Bus [28]

3.8. Recopilación de datos relevantes

En este apartado se van a resumir los datos obtenidos en la búsqueda de los autobuses anteriormente expuestos. Cabe señalar que de algunos de ellos no hay información, así como puede haberla de otros modelos que no han aparecido, y se va a incluir si resulta útil. También es interesante recordar que los datos de este capítulo son de partida, y luego pueden desarrollarse otras hipótesis o correcciones.

3.8.1 Consumos de combustible y electricidad

Primero, se han recopilado los consumos homologados de diversos autobuses. Para ello, se han elegido aquellos de los que se tenga un informe SORT de la UITP. Esto es debido a que posibles datos de consumo por parte del fabricante pueden no tener la fiabilidad necesaria en un trabajo de investigación. Los ciclos SORT están altamente estandarizados y permiten establecer un marco comparativo adecuado en este aspecto. Estos consumos se han ordenado en la siguiente tabla, por marcas:

Tabla 2: Recopilación de consumos en ciclos SORT de diversos autobuses.

Marca	Modelo	Combustible	Hibridación	Masa	Longitud	Altura	Anchura	Experimental (E/L) Tank [Wh/km]					
								SORT 1		SORT 2		SORT 3	
								L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km	L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km	L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km
Mercedes-Benz	Citaro EEV	Diésel	No	14230	12	3,095	2,55	45,63	4548,1	37,89	3776,6	33,84	3373,0
	Citaro Hybrid	Diésel	Micro	14280	12	3,095	2,55	38,22	3809,5	33,43	3332,1	31,35	3124,8
	Citaro articulado	Diésel	No	20910	18	3,095	2,55	54,99	5481,1	48,04	4788,3	45,42	4527,2
	eCitaro	Eléctrico	No	16760	12	3,095	2,55	88,20	882,0	83,10	831,0	82,90	829,0
	Citaro NGT	GNC	No	-	12	3,095	2,55	-	-	38,43	4973,9	-	-
MAN	A37 Hybrid	Diésel	Full paralelo	15300	12	3,01	2,55	33,00	3289,2	29,80	2970,3	28,70	2860,6
	Lion's City 12 EfficientHybrid 280	Diésel	Micro	14000	12	3,11	2,55	36,40	3628,1	32,10	3199,5	31,20	3109,8
	Lion's City 12 EfficientHybrid 330	Diésel	Micro	14000	12	3,11	2,55	36,70	3658,0	31,30	3119,8	29,80	2970,3
	Lion's City 12e	Eléctrico	No	17120	12	3,28	2,55	82,30	823,0	75,60	756,0	73,80	738,0
	Urbanway Hybrid 12	Diésel	Full serie	15525	12	3,393	2,5	27,70	2761,0	26,00	2591,5	27,60	2751,0
Iveco	Urbanway Hybrid 18	Diésel	Full serie	22903	18	3,393	2,5	39,90	3977,0	37,80	3767,7	-	-
	Citelis GNC	GNC	No	15150	12	3,3	2,5	48,53	6281,9	40,07	5186,8	-	-
	GX 337 Electric	Eléctrico	No	16510	12	2,88	2,55	84,63	846,3	80,77	807,7	-	-
Solaris	Urbino 12 Hybrid	Diésel	Full paralelo	13980	12	3,15	2,55	26,70	2661,3	-	-	-	-
	Urbino 18 Hybrid	Diésel	Full paralelo	22395	18	3,15	2,55	57,00	5681,4	-	-	-	-
Vectia	Veris 12 M3 Hybrid	Diésel	Full paralelo	16460	12	3,4	2,55	49,60	4943,8	39,20	3907,2	34,10	3398,9

Respecto a esta tabla, hay que comentar una serie de particularidades. Primero, se puede ver que no todos los autobuses tienen valores para los tres ciclos SORT. Esto es así porque la normativa de la UITP no es obligatoria realizarlos. Segundo, para convertir los consumos en energías por unidad de longitud, se ha usado, en el caso de los autobuses diésel y GNC, un factor de conversión obtenido con los datos de densidad (si aplica) y poder calorífico del combustible. Por ejemplo, para el caso del diésel sería:

$$0,87 \frac{kg}{l} * 11,98 \frac{kWh}{kg} * 10 \text{ (pasar de kWh a Wh y 100 km a km)} = 99,67$$

En el caso de los autobuses eléctricos, el consumo de energía en batería ya está expresado en energía por unidad de longitud, concretamente kWh/100 km, y tan solo hay que convertir a Wh/km con un simple factor de conversión exacto de 100.

Los informes SORT han sido proporcionados por la EMT. Se puede observar que, en su mayoría, corresponden a **autobuses híbridos y eléctricos**, puesto que son los dos tipos más valorados hoy en día. Esto no es un problema, porque así se tienen muchos datos de entrada, y dentro de los **híbridos** se pueden observar modelos microhíbridos, híbridos convencionales e híbridos en serie. Es especialmente útil el caso de Mercedes-Benz, en el que figuran alternativas de **diésel, microhíbridos, eléctricos, articulados y gas natural (GNC)**, aunque los datos de este último son más incompletos porque provienen del trabajo de Gis et al. [29], en el que se prueba este tipo de autobús en la ciudad de Poznan, Polonia. De todos modos, hay datos certificados de otro GNC.

Con estos datos de diésel y gas, se pueden calcular los consumos de otros combustibles alternativos, **biodiésel** y diésel sintético, y biometano. Esto se realiza escalando el consumo conocido con las densidades y los poderes caloríficos, de la siguiente forma:

$$\text{Consumo}_{\text{biodiésel}} = \text{Consumo}_{\text{diésel}} * \frac{\rho_{\text{diésel}} * H_{C-\text{diésel}}}{\rho_{\text{biodiésel}} * H_{C-\text{biodiésel}}}$$

Se realizaría de la misma forma para el **diésel sintético**, pero cambiando el biodiésel por éste. A continuación se presenta un ejemplo con el consumo SORT 1 del Mercedes-Benz Citaro EEV (*Enhanced Environmentally friendly Vehicle*, o vehículo con respeto al entorno mejorado, en una traducción aproximada):

$$45,63 \left[\frac{l}{100 \text{ km}} \right] * \frac{0,83 \left[\frac{kg}{l} \right] * 11,98 \left[\frac{kWh}{kg} \right]}{0,89 \left[\frac{kg}{l} \right] * 10,33 \left[\frac{kWh}{kg} \right]} = 49,35 \left[\frac{l}{100 \text{ km}} \right]$$

Con el **biometano**, se toma como partida el gas natural comprimido. En este caso no es necesario escalar las densidades porque los consumos ya van expresados en kg, y se puede aplicar una relación de poderes caloríficos directamente, de esta manera:

$$\text{Consumo}_{GNC} = \text{Consumo}_{\text{biometano}} * \frac{H_{c-GNC}}{H_{c-\text{biometano}}}$$

Al igual que se ha realizado con el biodiésel, se presenta a continuación un ejemplo con los datos del SORT 2 del Mercedes-Benz Citaro NGT:

$$63 \left[\frac{kg}{100 \text{ km}} \right] * \frac{12,94 \left[\frac{kWh}{kg} \right]}{12,81 \left[\frac{kWh}{kg} \right]} = 63,64 \left[\frac{kg}{100 \text{ km}} \right]$$

Se puede observar que en esta ocasión la diferencia es muy pequeña, y podría simplificarse como el mismo consumo sin incurrir en un error significativo.

Con ello, se tienen cubiertos datos de consumos de vehículos de diésel y homólogos, vehículos de gas y eléctricos. Si se vuelve a consultar la Tabla 2, puede uno percatarse de que faltan consumos sobre vehículos propulsados por hidrógeno. No se tiene constancia de pruebas oficiales de ciclos SORT con autobuses de estas características. Se tienen datos de fabricantes, como se ha señalado en los capítulos 3.3 y 3.4. No obstante, Doyle et al. [30] simularon con el uso de MATLAB los tres ciclos SORT en un **autobús con pila de combustible**:

Tabla 3: Consumos simulados de autobús con pila de combustible.

Marca	Modelo	Experimental (E/L) Tank [Wh/km]						Variación SORT 2 respecto 1	Variación SORT 3 respecto 2	Variación SORT 3 respecto 1
		SORT 1		SORT 2		SORT 3				
		L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km	L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km	L/100 km, kWh/100 km, kg/100 km	Wh/km			
Simulado pila de combustible		6,30	2100,0	5,67	1890,0	5,38	1793,33	10,0%	5,1%	14,6%

Al igual que en los casos anteriores, se aplica un factor de conversión a partir del poder calorífico. En este caso, al igual que en el gas natural, no se aplica la densidad porque el consumo ya viene expresado en unidades de masa, que concuerdan con el denominador de las unidades del poder calorífico.

Con ello, solo falta un dato: el consumo de los **motores de combustión alimentados por hidrógeno**. Se cuenta sólo con dos datos, que además no corresponden a ciclos SORT: 7,5 kg/100 km según Keyou, en el capítulo 3.3, y 22 kg/100 km, según datos de partida del CMT. Cabe decir que Lloret [2] fija en su trabajo un consumo de 11 kg/100 km para una cabeza tractora genérica. A la vista de estos datos tan dispares, se deben considerar estos valores como provisionales y corregirlos más adelante mediante las pruebas a realizar.

Para finalizar con los consumos, los **dual-fuel** se calculan según el porcentaje de uso de cada uno. Es decir, para un bus **hidrógeno-diésel** con 30% de hidrógeno, se toma

como base el diésel original y el consumo fijado de un autobús de combustión de hidrógeno. Se calcularía tomando el 70% del consumo del diésel y sumándole el 30% del consumo referencia de hidrógeno.

Tras recoger todos estos datos, se fijan unos **consumos de referencia** con los que trabajar de forma más sencilla, para cada alternativa. Estos provienen de aproximar los valores de las tablas anteriores, junto con información extra proveniente de fabricantes y del propio instituto CMT. Los valores definidos son:

- Diésel: 45 L/100 km.
- Diésel microhíbrido: 37 L/100 km.
- Diésel full-hybrid: 30 L/100 km.
- GNC: 48 kg/100 km.
- H₂ MCIA: 14 kg/100 km.
- Pila de combustible: 8 kg/100 km.
- Eléctrico a baterías: 90 kWh/100 km.

El valor del hidrógeno en MCIA es estimado, por la carencia de información en este aspecto. En el capítulo 5.1 se justifica esta decisión. Todos los demás métodos que no aparecen en la lista se calculan a partir de otros, con los métodos explicados anteriormente, que resultan:

- Biodiésel: 48,7 L/100 km.
- Biodiésel full-hybrid: 32,5 L/100 km.
- E-fuel diésel: 45 L/100 km.
- Biometano: 48,5 kg/100 km.
- Dual H₂-GNC: 4,2 kg/100 km +33,9 kg/100 km.
- Dual H₂-Diésel: 4,2 kg/100 km +31,5 L/100 km.

3.8.2 Masas de los vehículos en funcionamiento

La siguiente colección de datos relevantes es la correspondiente a las masas de cada alternativa. En este trabajo se van a considerar las masas presentes en los informes SORT siempre que ello sea posible. En este tipo de certificación siempre se prueba el autobús con un lastre, que corresponde al equipo de medición y además simula unos 40-45 pasajeros a bordo, y algunas certificaciones está desglosado. Para autobuses de 12 metros de longitud, es de unos 3000 kg. Este valor es importante señalarlo, porque servirá más tarde.

Como existen varios modelos concretos para cada alternativa, se tomará un valor aproximado de referencia, que se usará como dato de entrada de la tabla 2 cuando se necesite. Para contrastar más los datos, se han consultado también fichas técnicas de otros fabricantes, aunque no hubiera valores SORT, pero con el dato del lastre y a nivel comparativo es útil para afinar las diferencias.

Con todo esto, las **masas estimadas de referencia** para cada alternativa son:

- Diésel: 14000 kg.
- Diésel mild-hybrid: 14100 kg.

- Diésel full-hybrid: 15000 kg.
- GNC: 15000 kg.
- Eléctrico: 17000 kg.

Para los autobuses con **biodiésel o diésel sintético**, la masa es exactamente la misma que en el diésel convencional. Sucede lo mismo con el **biometano** con respecto al GNC. Sin embargo, seguirían faltando masas de las opciones que incluyen el **hidrógeno**, es decir, el hidrógeno en MCIA, dual-fuel con diésel, dual con GNC y el bus con pila de combustible. El primer y el tercer caso se calcularán en el apartado 4.5, porque desglosa las masas de los componentes de los sistemas propulsivos. Esto es necesario hacerlo de esta manera por la condición tan experimental de estos métodos. Para el **dual-fuel hidrógeno con GNC**, se puede suponer la misma masa que en un GNC porque, en principio, se toma el mismo autobús y se incluye una pequeña proporción de hidrógeno en el mismo depósito. Como el caso aquí analizado tiene un 30% de hidrógeno, esto es válido. Si fuese superior, se requerirían dos depósitos por la diferencia de presiones, al igual que con el **dual hidrógeno con diésel**, y se calcularía como este último.

Finalmente, para la alternativa con **pila de combustible** se ha partido del valor de masa en vacío del fabricante Foton [31], que usa tecnología de Toyota, al igual que el ya mencionado Caetano H2.City Gold. Dicha masa es de 12750 kg. Al añadir los 3000 kg de lastre propio de la certificación SORT, se obtiene una masa de 15750 kg.

3.8.3 Coste de adquisición

El último grupo de datos de entrada es el coste de adquisición de los autobuses. En el sector del transporte urbano, a diferencia del transporte ligero particular, los costes de los vehículos no se facilitan, y dependen mucho de convenios, contratos o acuerdos pactados con la empresa de transporte en un momento y situación particulares. En el CMT ya se tienen unos precios estimados, pero se va a realizar una pequeña revisión como muestra de la veracidad de estos datos.

Para ello, cabe señalar los precios de los autobuses microhíbridos y eléctricos. En los datos del CMT se tasan en 320.000 € y 550.000 €, respectivamente. En un informe del TUS (Transports Urbans de Sabadell) [32] se refleja un gasto de 7 autobuses híbridos de 12 metros con potencia mínima de 270 CV en el motor de combustión y 5 kW en el eléctrico (estos valores corresponden a una microhibridación) por valor de 2.205.000 €, y 6 eléctricos de 12 metros con potencia mínima de 160 kW y capacidad de batería mínima de 345 kWh, por valor de 3.300.000 €. Al dividir los valores por el número de unidades, se obtiene un precio de 315.000 € para el microhíbrido y 550.000 € para el eléctrico. Por ello, podemos concluir que los valores del CMT son próximos a los reales, y se presentan en la tabla presente bajo estas líneas:

Tabla 4: Precios estimados de diversos autobuses.

Sistema de propulsión	Precio (miles de €)
MCIA Diésel	280
Diésel <i>Mild-Hybrid</i>	320
Diésel híbrido	400
GNC	380
MCIA H2	400
MCIA H2-GNC	386
MCIA H2-Diésel	316
Pila de combustible	800
Eléctrico a baterías	550

Como ya se ha indicado, las alternativas alimentadas con biodiésel o diésel sintético usan el mismo autobús diésel convencional, y la única diferencia es el combustible que aporta la energía. La misma casuística existe con el biometano respecto del GNC. Para estimar los dos casos de combustibles combinados, se ha realizado la misma ponderación que se ha hecho para su consumo. Si la mezcla es un 30% hidrógeno y 70% diésel, el precio se calcula como la suma del 30% del coste de un autobús con MCIA de hidrógeno y del 70% del precio de un autobús con MCIA diésel.

4. Variables a considerar para realizar la comparación entre sistemas de propulsión

Este capítulo trata los datos que son variables en el uso del autobús, y que son necesarios a la hora de comparar los métodos propulsivos que se han detallado anteriormente en este trabajo. Estas variables son: potencias de propulsión (en rueda y tanque), consumo de energía primaria, masas y volúmenes de los sistemas de almacenamiento, emisiones de CO₂ y costes de operación.

4.1. Caracterización de los recorridos diarios

Caracterizar el marco de trabajo, es decir, los recorridos que realizarán los autobuses, es primordial para poder comparar en igualdad de condiciones las alternativas de propulsión disponibles.

En primer lugar, se estima un número de 260 días de servicio al año, en los que se realizará una jornada de 16 horas a una velocidad media de 12 km/h, dando como resultado 200 km diarios. Al cabo de un año, un autobús urbano recorrerá, bajo estas condiciones, 52.000 km. Este dato será útil para establecer los datos necesarios a toda la vida en funcionamiento del autobús.

Estos datos vienen proporcionados por la EMT en su colaboración con el CMT. Se sabe que los autobuses urbanos realizan jornadas muy intensivas y en un mismo día son llevados por varios conductores. La velocidad media de 12 km/h es coherente con lo indicado en la UITP (Unión Internacional del Transporte Urbano), que como se verá en el capítulo posterior, marca en 12,1 km/h la velocidad media de un ciclo de homologación urbano SORT 1.

4.2. Consumo de energía en rueda necesaria para propulsar un autobús y emisiones tanque a rueda

Para calcular la energía en rueda necesaria, se ha decidido simular los tres ciclos SORT (Standardized On Road Testcycle) de la UITP. Para ello es fundamental definir estos ciclos y todos sus parámetros.

Los ciclos SORT son tres ciclos concebidos para ser altamente reproducibles, con el objetivo de proporcionar una herramienta de homologación fiable y que permita la comparación entre los diversos modelos que se prueben. Para ello, cada uno está construido como la combinación de tres secciones o, como se refiere en la UITP, *trapecios*. Un trapecio siempre empieza desde parado, y consta de una aceleración, un tramo de velocidad constante, una frenada y un período de parada. Los cinco trapecios básicos de la metodología SORT están representados en la tabla siguiente:

Tabla 5: Trapecios básicos SORT.

Trapezio	Aceleración (m/s ²)	Velocidad objetivo (km/h)	Distancia v=cte. (m)	Frenado (m/s ²)	Tiempo parada (s)	Longitud total (m)
1	1,03	20	65,7	0,8	20	100
2	0,77	30	111,6	0,8	20	200
3	0,62	40	42,8	0,8	20	220
4	0,57	50	309,4	0,8	10	600
5	0,46	60	176,4	0,8	10	650

Con estos datos, se puede obtener toda información adicional necesaria, usando las ecuaciones de un movimiento rectilíneo uniforme o uniformemente acelerado. Los valores de aceleración vienen dados por información de la UITP de las aceleraciones que pueden alcanzar manteniendo unos estándares de confort y economía los autobuses actuales.

Una vez definidos los trapecios, los ciclos resultan, como se ha comentado, de tres combinaciones arbitrarias. El **ciclo SORT 1**, que simula un entorno urbano con tráfico denso, se forma con los **trapecios 1, 2 y 3** en ese mismo orden; el **SORT 2**, correspondiente a un entorno urbano con tráfico ligero, con los **trapecios 1, 3 y 4**; y el **SORT 3**, que equivale a un entorno interurbano, con los **trapecios 2, 4 y 5**. En una prueba de certificación real, cada uno de los ciclos se repite tres veces, y además el SORT 1 se hace en dos sentidos distintos, dando un total de 6. Adicionalmente, al final de la prueba, se añade un tiempo de parada prolongado para simular el tráfico de pasajeros, para medir otros consumos auxiliares del bus. No obstante, en una simulación informática es suficiente con hacerlo una sola vez, si el objetivo es, como es el caso, obtener la energía necesaria en rueda.

En este trabajo, al operar sobre un ciclo de medición de consumos estándar, ampliamente aceptado y normalizado, se evita el trabajo de caracterizar unos recorridos reales y realizar otro tipo de mediciones.

Para elaborar el programa de simulación, se partió de una versión anterior del mismo diseñado por el propio CMT, que simula una aceleración desde parado a 40 km/h a 0,37 m/s² y un frenado a 1,1 m/s². Este programa de simulación está elaborado en Excel.

Los **datos de entrada relevantes** son la **masa** del autobús, su **anchura y altura**, el **coeficiente aerodinámico**, y el **rendimiento del sistema de frenado regenerativo** si existe. El dato de salida más importante es, como se ha dicho, la energía necesaria en rueda para que el vehículo siga el ciclo definido. Para simular el avance del autobús se caracteriza su velocidad por intervalos de tiempo de 0,2 s, siguiendo las aceleraciones, velocidades objetivo, distancias y tiempos de parada establecidas en SORT (Tabla 5).

Gráficamente, los ciclos se pueden representar como la velocidad del vehículo en función del tiempo ($V=f(t)$) o bien en función de la distancia recorrida ($V=f(L)$), resultando:

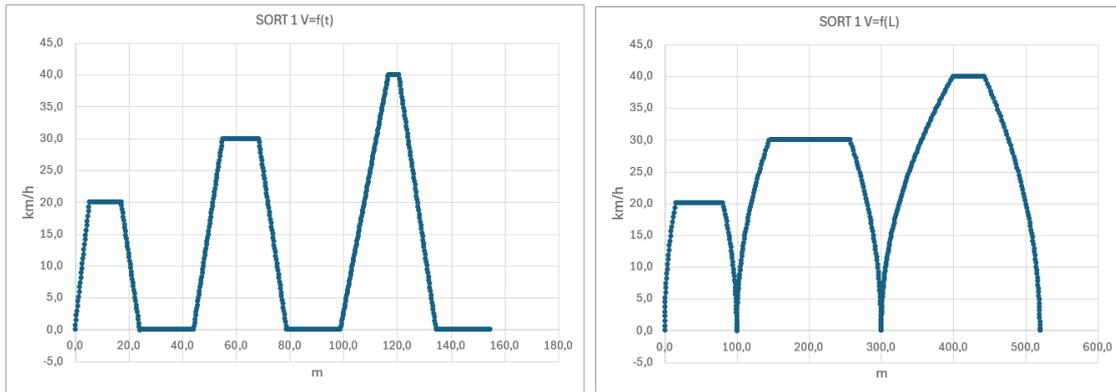


Figura 22: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 1.

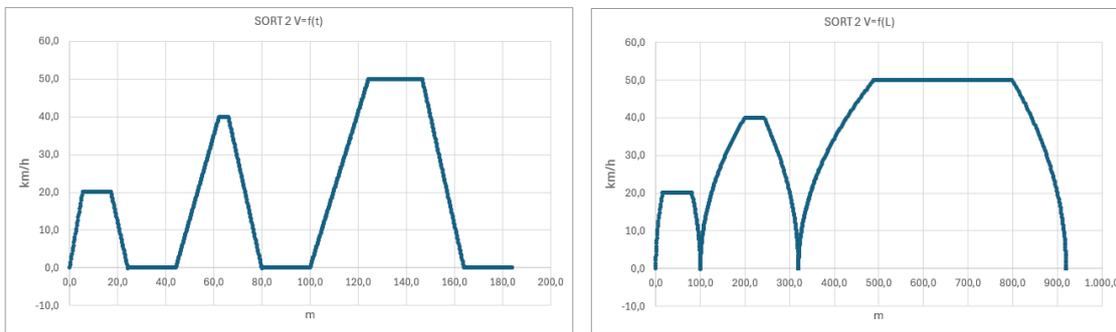


Figura 23: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 2.

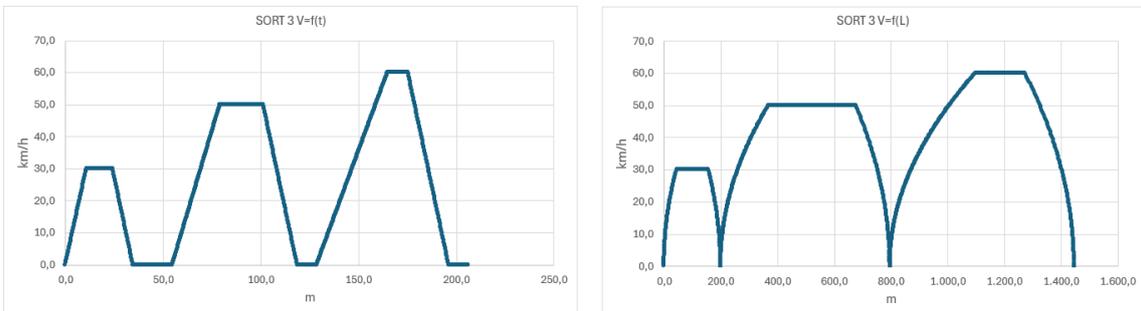


Figura 24: Gráficas de velocidad respecto al tiempo y la distancia del SORT 3.

Ahora que los ciclos están definidos, tal y como se han introducido en programa de simulación, se adjunta una ilustración de esta, mostrando los parámetros y la interfaz:

Peso	17.000	Densidad aire	1,18	Intervalo (s)	0,2	Tempo total recorrido (s)	154,5	Energía Inicial Tank (Wh)	1.000,0	Energía final Tank (kWh)	368,3	Energía consumida Tank (Wh)	631,7	Energía consumida Tank (Wh/km)	1.215,3	Resultado Tank con Rend Tank-to-Wheel			
Alto	3,3	Rendimiento Tank-to-Wheel	91%	SORT1											12,2	39,9			
Ancho	2,55	Rend freno reg	82%	% Fricción regenerativo	100%	Espacio recorrido (m)	519,8	Potencia minrueda (kW)	-109,7	Pot media rueda (solo >=0)	25,7	Pot media rueda (kW) (+y-)	10,96	Pot max rueda (kW)	156,4	Rend. Diesel Tank-to-Wheel 30,5%			
Cx	0,6	Crod	0,016			Velocidad media (km/h)	12,1												
Tiempo (s)	0,0	Velocidad (km/h)	0,0	Factor Fricción (-)	Potencia Wheel Frod*V (W)	Fareo (N)	Potencia Wheel Fareo*V (W)	Energía Cinética (J)	Potencia Wheel rod + aero (kW)	Potencia Wheel para acelerar (kW)	Potencia Wheel total (kW)	Espacio recorrido (m)	Energía Wheel total 100% (Wh/int)	Energía Wheel Propulsar (Wh/int)	Energía Wheel Frenar (Wh/int)	Energía Acum. Extraída Tank (Wh)	Energía Acum. Regener. Tank (Wh)	Energía en Tank con Regen. (Wh)	
0,2	0,7	0,0	0,0	2,668,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1.000,0	
0,4	1,5	0,4	0,0	2,693,1	1,109,5	0,5	0,2	1,442,8	1,1	5,4	6,5	6,5	0,2	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	999,9
0,6	2,2	0,6	0,0	2,705,4	1,672,0	1,1	0,7	3,246,4	1,7	9,0	10,7	10,7	0,2	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	999,1
0,8	3,0	0,8	0,0	2,717,8	2,239,5	2,0	1,7	5,771,3	2,2	12,6	14,9	14,9	0,3	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	998,4
1,0	3,7	1,0	0,0	2,730,2	2,812,1	3,2	3,3	9,017,7	2,8	16,2	19,0	19,0	0,5	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0	997,3
1,2	4,4	1,2	0,0	2,742,5	3,389,8	4,6	5,6	12,985,4	3,4	19,8	23,2	23,2	0,7	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0	996,0
1,4	5,2	1,4	0,0	2,754,9	3,972,6	6,2	8,9	17,874,6	4,0	23,4	27,4	27,4	1,0	1,4	1,4	0,0	0,0	0,0	994,5
1,6	5,9	1,6	0,0	2,767,3	4,560,4	8,1	13,3	23,085,2	4,6	27,1	31,6	31,6	1,3	1,6	1,6	0,0	0,0	0,0	992,7
1,8	6,7	1,8	0,0	2,779,6	5,153,4	10,2	19,0	29,217,2	5,2	30,7	35,8	35,8	1,7	1,9	1,9	0,0	0,0	0,0	990,6
2,0	7,4	2,0	0,0	2,792,0	5,751,5	12,7	26,1	36,070,6	5,8	34,3	40,0	40,0	2,1	2,1	2,1	0,0	0,0	0,0	988,3

Figura 25: Extracto de la hoja Excel de la simulación del SORT 1.

El valor de la **energía en rueda por unidad de longitud** necesaria viene destacado en color rosado. Modificando los parámetros resaltados en amarillo, se puede caracterizar cada modelo de autobús, y con ello conseguir datos personalizados de cada uno. En amarillo fuerte están resaltados los valores con más impacto en el resultado, el peso y el rendimiento del freno regenerativo. En amarillo suave, se han destacado valores que son siempre similares y/o no impactan significativamente en la energía en rueda. Como comentario, la fracción de frenado que es regenerativo no afecta a la energía en rueda porque no influye en la motricidad del vehículo en el ciclo. Pero, sí afecta el rendimiento de esa frenada regenerativa para saber cuánta energía se devuelve a la batería, y ello sí afecta a los balances netos de energía en el ciclo.

Aunque se han simulado los tres ciclos, era necesario acotar qué valor de energía en rueda se iba a elegir: uno de los tres ciclos, la media, algún tipo de ponderación... Se ha decidido seleccionar el ciclo SORT 1, porque su concepción es la más enfocada al tipo de transporte que se trata en este trabajo, el urbano. La EMT cifra un valor de velocidad media en un servicio de unos 12 km/h, y el SORT 1 tiene una velocidad media de 12,1 km/h. Anteriormente, en este mismo capítulo, se ha catalogado este ciclo como una simulación de entorno urbano denso. La ciudad de Valencia suele tener una cantidad importante de tráfico durante todo el día exceptuando horas nocturnas o momentos puntuales durante el día. Además, muchas de las líneas transcurren por zonas céntricas o con muchos semáforos y paradas frecuentes. Por ello, el **ciclo elegido como referencia** para el cálculo de la energía en rueda y el resto de los resultados es el **SORT 1 de la UITP**.

En cuanto se tiene la energía en rueda calculada, se puede comparar con la energía consumida en tanque correspondiente al SORT 1, presente en la Tabla 2, para poder así obtener los rendimientos del sistema de propulsión, o *Tank-to-Wheel*.

Para finalizar, con el dato de **energía consumida en tanque por unidad de longitud**, se calculan las **emisiones de CO₂** mediante el uso de los *factores de emisión*, que transforman los Wh consumidos en gramos de CO₂ tal y como se ha explicado en el capítulo 2.2.

En la siguiente figura se comparan estos coeficientes según cada combustible:

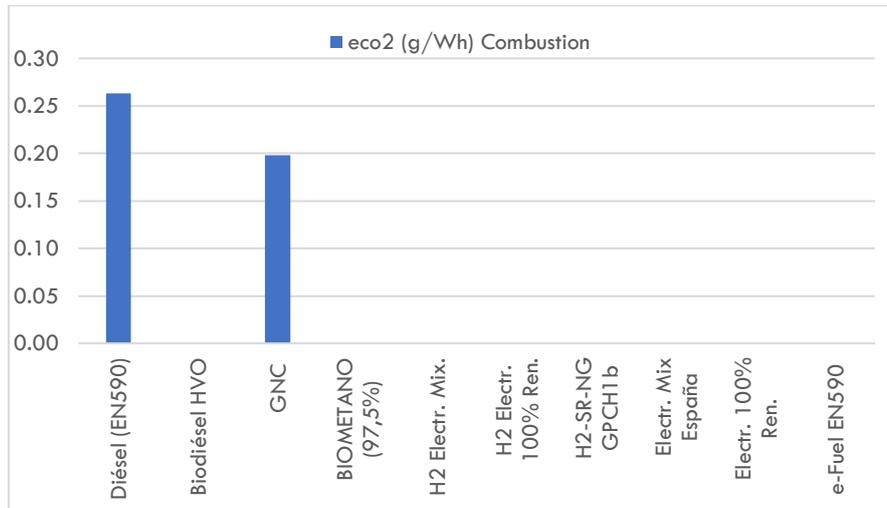


Figura 26: Coeficientes de emisiones de tanque a rueda.

Como se podía suponer, sólo el diésel y el GNC emiten CO₂ en su funcionamiento. El biodiésel y el *e-fuel* emiten lo que se ha usado en su constitución, por lo que el balance es neto. Los restantes no emiten ningún tipo de dióxido de carbono, en el caso del hidrógeno por la ausencia de carbono en las moléculas y en el del eléctrico, porque no se emiten gases.

4.3. Consumo de energía y emisiones de pozo a tanque

Como recordatorio, los consumos de energía y emisiones *Well-to-Tank* son aquellas que suceden en el proceso de producción y distribución del combustible, hasta llegar al depósito o batería objetivo. Para obtener información sobre esta fase, dejamos de contar con valores experimentales, como son consumos en un ciclo estandarizado, o incluso teóricos pero que proceden de una simulación que hacemos nosotros mismos. Por lo tanto, aquí resulta fundamental la información proveniente del *JEC Well-to-Tank report* [33], que también contiene de nuevo los coeficientes de transformación que se requiere para el cálculo.

Esta organización proporciona el consumo de energía con un valor que se relaciona con cada unidad de energía consumida en tanque. Así, partiendo de este último dato se puede obtener con facilidad la energía consumida, que de otra forma sería mucho más tedioso e incierto por la gran cantidad de variables y procesos que hay involucrados.

Para los combustibles que se han considerado en este proyecto, los datos son los que se presentan en la siguiente figura:

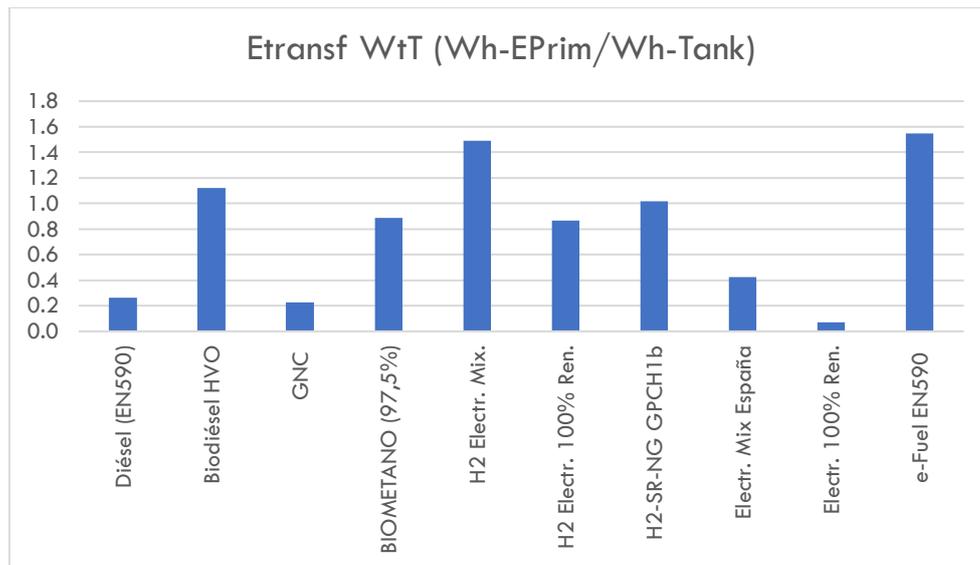


Figura 27: Energías de transformación W-t-T.

Para aclarar, se va a realizar un ejemplo sencillo. Para el diésel, el valor de energía de transformación es de 0,264 Wh-EPrim/Wh-Tank. Para cada Wh que llega al tanque, se han utilizado 0,264 Wh en todo el proceso que corresponda.

El segundo comentario necesario es referente al caso de la producción de **electricidad 100% renovable**. Se le imputa unas pérdidas de energía en los procesos de pozo a tanque prácticamente nulas, porque es una energía que se obtiene de fuentes renovables. Sin embargo, cabe clarificar que para aprovechar dichas fuentes sí es necesaria una infraestructura, que sí requiere de un consumo energético, pero es un tema que no forma parte de este trabajo.

Las emisiones de CO₂ se calculan de la misma forma que en el proceso *Tank-to-Wheel*, es decir, con el uso de factores de emisión con respecto a la energía utilizada en la fase que se esté analizando:

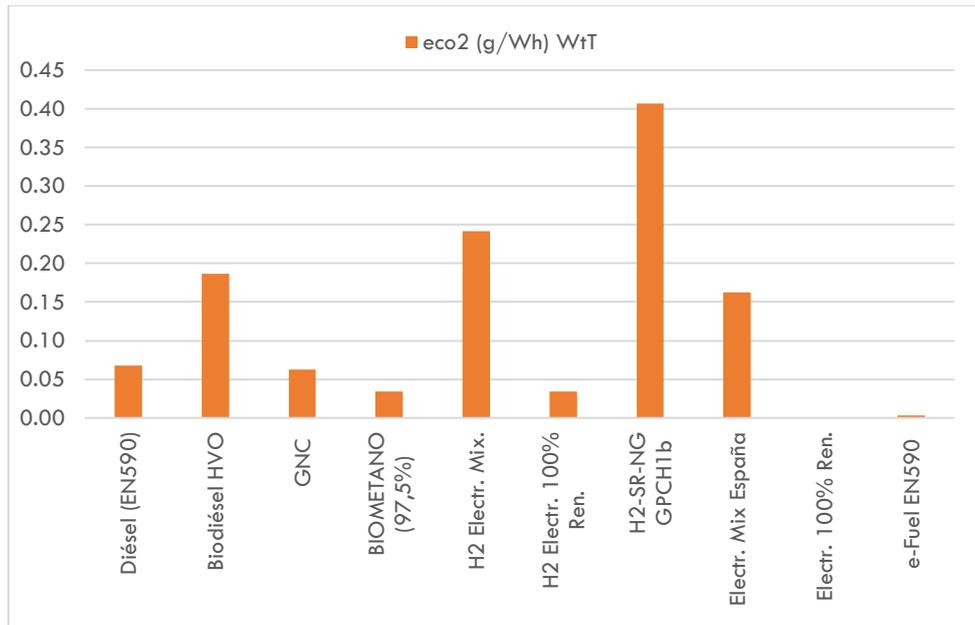


Figura 28: Coeficientes de emisiones de pozo a tanque.

Al analizar este gráfico, se puede concluir que las emisiones de aquellos combustibles que usan **energía eléctrica** en su proceso de transformación dependen del origen de ésta, que incluyen la mencionada anteriormente 100% renovable o del *Mix* eléctrico español, que incluye electricidad generada por una mezcla de fuentes renovables y no renovables, y es el que se distribuye por la red eléctrica española (REE). En la figura siguiente se muestra cómo, en el caso de España, el *Mix* eléctrico incluye un porcentaje importante de energía de orígenes renovables. Este hecho afecta de forma positiva a las opciones que la usen, y hace que no resulten más penalizadas con respecto a la opción 100% renovables, pero puede que no sea así en otros países donde no exista tanta explotación de estas fuentes de energía.

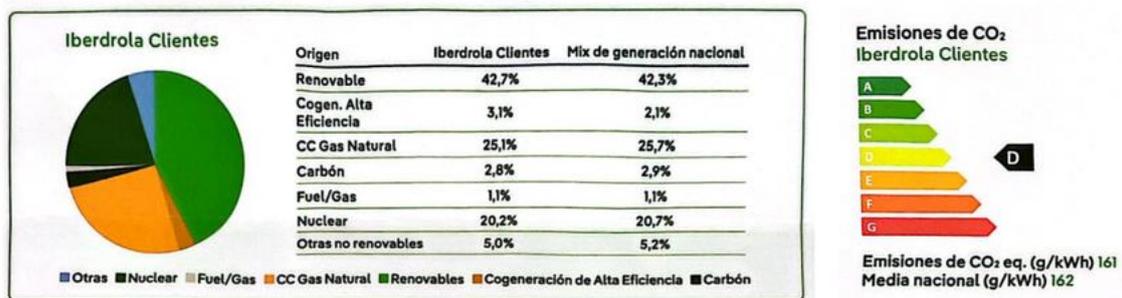


Figura 29: Porcentajes de orígenes de la energía eléctrica de la REE y emisiones de CO₂, extraídos de una factura de Iberdrola.

El siguiente combustible que tiene varios niveles de emisiones es el **hidrógeno**. El hidrógeno no se puede encontrar de forma directa en la naturaleza, es decir, de forma aislada, sino que es un elemento que se incluye en moléculas de multitud de sustancias.

Por lo tanto, el método para obtener hidrógeno puro pasa por obtenerlo de dichas sustancias. Las más utilizadas para ello son el agua (H_2O) y los hidrocarburos. Por abundancia y sencillez, se suele optar por el metano (CH_4), ya que es el componente principal del gas natural, que resulta muy abundante y está muy explotado. Existen otras vías, pero en este trabajo se explican las dos más habituales.

Por un lado, para obtener **hidrógeno a partir de agua**, el procedimiento habitual es la **electrólisis**, en la que se descompone en oxígeno e hidrógeno. Sin entrar en demasiado detalle, se sumergen dos electrodos conectados a una fuente de energía eléctrica en el agua. Al hacer esto, se inicia un flujo de electrones desde el ánodo al cátodo. En el ánodo se genera oxígeno, mientras que en el cátodo se liberan átomos de hidrógeno, que debe combinarse dos a dos para formar la molécula del hidrógeno gaseoso. En cuanto esto sucede, se captura, y se habría conseguido el objetivo. Al requerir de una fuente de energía eléctrica, este método de obtención de hidrógeno también está en gran parte afectado por el origen de la electricidad, que se ha explicado en líneas superiores.

Por otro lado, la segunda fuente de producción de hidrógeno es el **reformado de gas natural con el uso de vapor**. Este proceso consiste en hacer reaccionar vapor con elevada presión y temperatura con un hidrocarburo, concretamente el citado gas natural. El resultado de este proceso es un llamado "gas de síntesis", que es muy rico en hidrógeno y monóxido de carbono. Posteriormente, a este gas se le hace reaccionar con agua, para obtener finalmente moléculas de gas de hidrógeno y CO_2 . En la teoría, el proceso estaría finalizado, pero en la práctica se debe hacer un último filtrado, llamado purificación de H_2 , para eliminar cualquier impureza restante.

El hidrógeno se clasifica en **colores** según sus emisiones en producción, de acuerdo al MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico)[34]:

- Hidrógeno **verde**: producido a partir de electrólisis de agua con uso de energía eléctrica renovable, reformado de biogás con vapor de agua o conversión bioquímica de biomasa, aunque estas dos últimas vías sujetas a la conformidad con una serie de requisitos de sostenibilidad.
- Hidrógeno **rosa**: incluye el mismo proceso de electrólisis de agua, pero la electricidad proviene de energía nuclear estrictamente. Las emisiones de CO_2 son nulas, al igual que el verde, pero genera residuos radioactivos.
- Hidrógeno **azul**: aquí se ubica el reformado de gas natural o similares, con base de metano, pero utiliza técnicas de captura del carbono producido en el proceso. Según el MITECO se puede reducir hasta un 95% de las emisiones de CO_2 con estas técnicas.
- Hidrógeno **gris**: utiliza el mismo método que el hidrógeno azul, pero sin la captura de las emisiones de carbono.
- Hidrógeno **amarillo**: en esta clasificación entra el hidrógeno producido en la electrólisis de agua, pero producido con electricidad del *Mix* eléctrico español.
- Hidrógeno **turquesa**: este hidrógeno se obtiene con otro método, la pirólisis de metano, que genera como residuo carbono sólido.
- Hidrógeno **negro/marrón**: generado a partir de carbón, mediante un proceso de gasificación.

Aclarados los detalles sobre los orígenes de la electricidad y el hidrógeno, las producciones del resto de combustibles son las recogidas en los documentos del *JEC Well-to-Tank report* [33].

4.4. Características específicas de los sistemas de propulsión

En este capítulo se detallan las principales características de los sistemas motrices, la potencia y el peso. Como sistemas motrices se va a considerar los motores, y las pilas de combustible. Éstas últimas, en cierto modo, se pueden considerar similares a los motores, en combinación con el motor eléctrico. Haciendo analogía con un autobús diésel, se le alimenta con dicho combustible, y un motor de combustión convierte su energía química en energía mecánica. En un autobús con pila de combustible, se alimenta con hidrógeno a presión, y se transforma su energía química en mecánica a través del tándem formado por la pila y el motor eléctrico, solo que se usa la energía eléctrica como vector intermedio. Otra visión existente en el ámbito de la investigación sobre los sistemas con pila de combustible es catalogarlos como un híbrido en serie, al menos en su estado actual. La pila de combustible es un generador, y viene apoyado por un sistema de baterías.

El Instituto CMT tiene datos que relacionan la potencia de los motores con su peso y volumen, que se presentan en una tabla a continuación:

Tabla 6: Potencia, peso y volumen específicos de diferentes motores.

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

Cuanto más elevados son estos valores, se considera mejor, ya que significa que a equivalencia de potencia se obtiene un propulsor con menor tamaño y peso.

Tras revisar el informe más reciente de flota de la EMT [15], se puede observar que, en líneas generales, las potencias de los motores diésel oscilan entre los 220 CV (164 kW) y 355 CV (265 kW) especialmente en modelos articulados. En el CMT se cifra en 235 kW (315 CV) como un valor general factible para un motor diésel para esta aplicación. Se asume esta misma potencia para el resto de los motores de combustión interna, los de GNC y H₂, y también el mismo valor en cuanto las relaciones de la Tabla 6. Si bien estos últimos son motores de encendido provocado por chispa, y los diésel por compresión, se supone que la diferencia de masa y volumen a igualdad de potencia no es significativa, especialmente en el ámbito de los autobuses, que utilizan motores muy grandes y pensados para resistir bien el maltrato del ámbito urbano y largas jornadas de trabajo, además de que el ahorro de peso no es tan crucial como en un vehículo más ligero. Por lo tanto, para un MCIA de 235 kW, la masa será de unos 783,3 kg, con un volumen de 1566,66 L.

Para los motores eléctricos, el valor genérico del CMT es de 250 kW (335 CV). Resulta ligeramente superior en comparación con los MCIA, para compensar el peso superior de estas alternativas. Los datos que se muestran en la tabla corresponden al motor BorgWarner HVH250, que tiene una potencia máxima de 175 kW (235 CV), pero por las características de estos motores, se supone que el error al extrapolar sus datos de peso y volumen específicos no es alto. Por tanto, para un motor eléctrico de 250 kW, el peso sería de unos 390 kg con un volumen de aproximadamente 17 L, especialmente compacto, por sus grandes rendimientos y simplicidad mecánica, con una ausencia casi total de sistemas auxiliares asociados a la propulsión.

Finalmente, los datos para las pilas de combustible tienen mucha más dispersión. Los primeros valores corresponden a una pila de combustible de Toyota diseñada para automoción, en concreto para su berlina Mirai. Los valores específicos son muy altos porque el espacio resulta mucho más escaso que en un autobús o un camión. Por tanto, estos datos no resultan relevantes para el caso aquí tratado. Los segundos provienen de una pila de la marca Nuvera, el modelo E-60-HD. Se trata de una pila de combustible diseñada para todo tipo de aplicaciones de alto tonelaje, entre las que se incluyen autobuses, autocares o camiones. Tiene una potencia de 60 kW, y existe una versión más compacta de 45 kW, la E-45. La última pareja de valores pertenece a la pila Hyundai GEN 2, de 95 kW de potencia. Esta pila está más enfocada a su uso en cabezas tractoras, preparadas para el transporte de mercancías por carretera, más que para el transporte de personas por ciudad.

Si se revisa el capítulo 3.4 se puede observar que la pila de combustible del autobús fabricado por Caetano tiene 60 kW de potencia, por lo que, junto con su enfoque más versátil, se concluye que la pila de un autobús urbano es más equivalente al modelo de Nuvera. Con esta suposición, la masa se situaría en los 190 kg con un volumen de 285 L.

4.5. Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento

Al igual que se ha detallado en el apartado anterior con los sistemas propulsivos, se van a mostrar las masas y volúmenes específicos de cada sistema de almacenamiento. Esto incluye tanto el contenedor como el contenido, es decir, el combustible, si es que existe.

Los datos son los siguientes:

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

Sistema Almac. = Combustible + Contenedor Tipo de almacenamiento	Unidad característica	Densidad propia mcomb/Vcomb (kg/L)	Densidad aparente mcomb/Vsist (kgcomb/Lsist)	Energía específica Combustible (kWh/kg)	Energía específica Sistema E/msist (kWh/kg)	Fracción masa fm (mcomb/(mcomb+mcontenedor))	Masa del sistema msist/E (kgsist/kWh)	Fracción volumen fv (Vcomb/(Vcomb+Vcontenedor))	Volumen del sistema Vsist/E (Lsist/kWh)
Gasóleo	L	0,832	0,749	11,980	11,022	92%	0,091	90%	0,111
Biodiésel	L	0,890	0,801	10,333	9,507	92%	0,105	90%	0,121
e-Fuel diésel	L	0,780	0,702	12,222	11,244	92%	0,089	90%	0,117
GNC 20 MPa	kg	190,795	0,167	12,944	4,531	35%	0,221	NA	0,464
Biometano 20 MPa	kg	182,000	0,167	12,806	4,482	35%	0,223	NA	0,469
H2 35 MPa	kg	22,873	0,017	33,330	1,667	5%	0,600	NA	1,800
Batería electr. Vehículos	kWh	NA		0,141	0,141	NA	7,092	NA	6,447

Los datos presentados son proporcionados por el instituto CMT, y corresponden a camiones. No obstante, esto no es un problema puesto que tecnológicamente los sistemas de almacenamiento son equivalentes. En este caso se ha descartado el GNL y el H₂ a 700 bares (70 MPa) porque no se usan en autobuses urbanos, pero el resto son equivalentes. Los datos de las columnas blancas corresponden a pasos previos para comparar en igualdad de condiciones todas las opciones. El objetivo es eliminar las diferencias entre combustibles gaseosos, líquidos y la energía eléctrica, y por ello todo se tiene que expresar en unidades de energía. En verde se resaltan los datos finales, es decir, los específicos, que relacionan las masas y volúmenes con la energía almacenada.

Como se puede apreciar en la tabla, los **combustibles líquidos** (diésel y homólogos) son los que mejor masa y volumen específico tienen, por su estado físico. Entre ellos, las diferencias son mínimas y no causaría apenas error suponer los mismos para todos. Como ejemplo rápido, en el apartado 4.1 se ha fijado un recorrido diario de 200 km al día. Suponiendo un consumo de 45 L/100 km, resultan 90 L/día. Usando el dato de densidad y densidad energética del diésel (presentes en las ecuaciones del apartado 3.7), se obtienen 897 kWh diarios en consumo energético. Tras multiplicar este consumo por los valores de masa y volumen específicos, los resultados son 81 kg, que incluyen contenedor y contenido, y 100 L.

A continuación, aparecerían los combustibles gaseosos. En este caso, el **GNC** y el **biometano**, que son prácticamente equivalentes, tienen casi los mismos datos. Haciendo el mismo ejercicio que en el diésel anterior, se toma un consumo preliminar de 48,5 kg/100 km, que son 97 kg en un día. Como ya está expresado en kg, se utiliza directamente el dato de la densidad energética para obtener la energía, que son 1256 kWh diarios. Tras aplicar los datos de la tabla 7, la masa total es de 277 kg y el volumen, de 582 L.

El combustible gaseoso restante es el **hidrógeno**. Se almacena habitualmente en los autobuses a 350 bares (35 MPa) y sus valores de masa y volumen específico son más desfavorables que el GNC y biometano. Sin embargo, esto puede paliarse en mayor o menor medida según el sistema de propulsión que se use. Por ejemplo, se va a tomar un caso hipotético de pila de combustible. Si se supone un consumo de 14 kg/100 km como valor inicial supuestamente acertado, y siguiendo exactamente la misma metodología que en los ejemplos anteriores, el consumo diario es de 28 kg, que son 933 kWh en energía consumida, que con los datos de la tabla 7 resultan 560 kg en masa y 1680 L en volumen.

Por último, resta dimensionar las **baterías**. Como es sabido, no almacenan ningún tipo de combustible, sino que acumulan la propia energía eléctrica que va a usar el motor eléctrico. Con un consumo de 90 kWh/100 km, se necesitarían 180 kWh para cubrir la jornada. Sin embargo, a diferencia de los casos previos, no hay un combustible, y la batería tiene la misma masa esté llena o vacía. Por lo tanto, se requiere saber la capacidad de la batería, y no usar el mismo método que en el resto de sistemas. Si se supone una capacidad de 400 kWh, con los datos de la tabla 7, la masa de la batería serían 2837 kg y el volumen, 2579 L. Se puede apreciar que los valores son considerablemente mayores que en cualquier otro sistema de almacenamiento.

En el caso de las alternativas de **propulsión híbridas**, se realizaría el mismo ejercicio que con un diésel, con el consumo que se hubiese obtenido en dicho caso, y se le sumaría la masa y volumen de la batería según su capacidad. Ídem, como se ha dicho en líneas superiores, con el autobús con pila de combustible.

Para finalizar, con estos datos se pueden calcular las masas de los casos que se dejaron pendientes en el apartado 3.7, **el hidrógeno en MCIA** y **el dual-fuel hidrógeno con diésel**. Para el primer caso, se parte de la base del GNC, cuya tipología es muy similar, porque ambos usan combustibles gaseosos almacenados a presión y motores de encendido por chispa. A éste se le resta la masa del depósito de GNC y se le suma la del equivalente en hidrógeno. El resultado son 15.283 kg. Para el segundo, solo se debe sumar un depósito de hidrógeno, que será más compacto que el primer caso. El consumo de hidrógeno es un 30%, que tras realizar los mismos cálculos que anteriormente, resultan en 29 kg de depósito. La masa total es de 14.050 kg. Si bien el consumo de diésel será un 70% del diésel convencional, se supone el mismo depósito porque es una adaptación. Resultaría más caro sustituir este depósito, que no simplemente añadir uno de hidrógeno.

Por tanto, uno se puede percatar de que no todos estos datos se van a usar en el trabajo, porque se han obtenido masas certificadas en su apartado correspondiente. El objetivo de haber presentado toda esta información es calcular la masa de aquellas alternativas que sí requerían de algunos de los datos, mostrar numéricamente las diferencias de cada componente de los diversos sistemas y por último tener una noción sobre los volúmenes que ocupan todos ellos.

4.6. Emisiones de CO₂ en la fabricación de los autobuses

El presente apartado explica las emisiones que se vinculan al proceso de fabricación de cada autobús. Para ello, se van a tratar datos de dos fuentes principales: la primera, el propio CMT, cuyos datos provienen de una recopilación de estudios previos, contactos con la EMT en su colaboración y otros trabajos; la segunda, el estudio sobre el modelo GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) [35] por parte del propio CMT, mediante el cual se obtienen datos específicos relacionados con las emisiones.

Los datos provienen de estas fuentes porque los fabricantes no suelen facilitar las emisiones de CO₂ que causa la fabricación de cada modelo, o incluso de cada componente, porque es información que puede revelar particularidades en su proceso de fabricación o ineficiencias.

En primer lugar, se tratan los **elementos comunes** en todos los autobuses, que son la carrocería (*body*) y el chasis, junto con otros **elementos estructurales** (*chassis and frame*). Elementos misceláneos como luces, asientos y otros van contabilizados dentro de la carrocería. Para estos, con la aplicación GREET, el CMT calculó la emisión de CO₂ asociada a la fabricación de un autobús en 8,5 kg CO₂/kg. Con una masa de estos elementos aproximada de 11.000 kg, las emisiones resultan de 93.500 kg CO₂/autobús.

Con este punto de partida, se pueden ir añadiendo según el tipo de autobús que se trate las emisiones imputadas a los diversos elementos del sistema de propulsión concreto. De la misma aplicación GREET se extraen los siguientes valores de diversos elementos:

Tabla 8: Emisiones de CO₂ de los componentes de los sistemas propulsivos.

Emisiones CO ₂ Fabricación Componentes Sistema Propulsión	
Motor de combustión interna diésel	7,3 kgCO ₂ /kW
Batería	150 kgCO ₂ /kWh
Motor eléctrico	43 kgCO ₂ /kW
Pila de combustible	8,0 kgCO ₂ /kW
Almacenamiento H₂ a presión	425 kgCO ₂ /kg H ₂
Almacenamiento GNC	142 kgCO ₂ /kg GNC

De esta forma, según las características de cada elemento se le pueden imputar unas emisiones. Habiendo hecho esto, los resultados serían los siguientes:

Tabla 9: Emisiones totales de CO₂ de cada alternativa de propulsión.

Sistema de propulsión	Emisiones sólo carrocería y chasis (kg CO ₂ /bus)	Potencia motor (kW)	Emisiones motor (kg CO ₂ /bus)	Potencia motor 2 (kW)	Emisiones motor 2 (kg CO ₂ /bus)	Capacidad batería (kWh)	Emisiones fabricación batería (kg CO ₂ /bus)	Potencia PC (kW)	Emisiones PC (kg CO ₂ /bus)	Capacidad almacenamiento gas a presión (kg)	Emisiones almacenamiento gas a presión (kg CO ₂ /bus)	EMISIONES TOTALES (kg CO ₂ /bus)
Diésel	93.500	235	1.715,5	-	-	-	-	-	-	-	-	95.216
Diésel mild	93.500	200	1.460,0	20	854	0,045	7	-	-	-	-	95.821
Híbrido	93.500	175	1.277,5	65,0	2.775,8	10,0	1.500,0	-	-	-	-	99.053
GNC	93.500	235	1.715,5	-	-	-	-	-	-	97,0	13.741,7	108.957
H ₂ MCIA	93.500	235	1.715,5	-	-	-	-	-	-	16,0	6.800,0	102.016
Pila combustible	93.500	250	10.676,3	-	-	30,0	4.500,0	70,0	560,0	16,0	6.800,0	116.036
Eléctrico baterías	93.500	250	10.676,3	-	-	400,0	60.000,0	-	-	-	-	164.176
Dual H ₂ -Diésel	93.500	235	1.715,5	-	-	-	-	-	-	1,4	612,0	95.828

Con estos datos sobre la mesa ya se puede observar que el autobús que más emite en su fabricación es el eléctrico a baterías, especialmente debido a estas últimas. Le siguen los autobuses de pila de combustible, hidrógeno en motor de combustión y gas natural comprimido, en ese orden y muy ajustados entre ellos, aunque con un margen grande respecto al eléctrico. Los autobuses diésel son los que menos CO₂ emiten en su fabricación. La microhibridación tiene un impacto muy bajo en este aspecto, por el tamaño reducido de la batería y escasa potencia del motor eléctrico. Los híbridos convencionales sí se ven algo más afectados, pero sin acercarse a las alternativas con combustible gaseoso. Por último, el dual-fuel H₂-Diésel es también muy cercano al diésel convencional, porque solo añade un depósito muy pequeño de hidrógeno. El caso dual-fuel H₂-GNC tiene el mismo valor que el GNC, porque el autobús se considera el mismo.

5. Resultados obtenidos para cada alternativa de propulsión

En este capítulo se va a proceder a la comparación de las alternativas presentadas anteriormente, con el uso de los datos presentados y los resultados de las variables que se han considerado relevantes. Los ítems de comparación son energías, emisiones y costes por unidad de longitud, y tanto masas como volúmenes exactos debidos al sistema de almacenamiento.

5.1. Energía consumida por unidad de longitud

5.1.1 Energía necesaria en rueda

Este parámetro representa cuánta energía se necesita aplicar para que el vehículo complete su recorrido. Como se ha explicado en el apartado 4.2, el recorrido elegido es el modelo SORT 1 de la UITP por la abundancia de datos, nivel de estandarización, reconocimiento internacional y facilidad de réplica. Usando el programa de simulación desarrollado, con los datos de entrada que se explicaron en el mismo capítulo, los resultados son los siguientes:

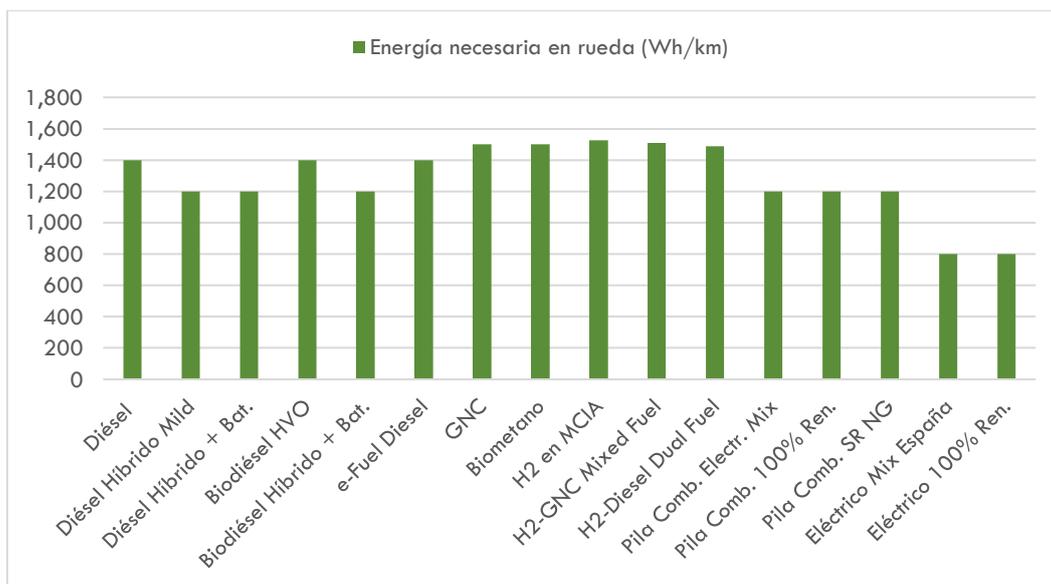


Figura 30: Energía por unidad de longitud necesaria en rueda.

En este caso, los factores que más impactan en el resultado son la masa y el frenado regenerativo. Mucho menor es la influencia del área frontal y el C_x , que además son casi idénticos en la mayoría de modelos con similar edad. Como se puede observar, si bien los autobuses eléctricos o de pila de combustible, si bien son los más pesados, se ven muy beneficiados por su alta capacidad de recuperación de energía en frenadas. Por el contrario, las alternativas propulsadas por combustibles en estado gaseoso se ven perjudicadas por su también considerable peso y ausencia de frenado regenerativo.

En el caso concreto del autobús eléctrico a baterías, el dato inicial ofrecido por la simulación fue de entre 1000 Wh/km y 1300 Wh/km, según como se valorase el modo de frenado regenerativo. En cualquier caso, ambos datos provocan rendimientos superiores al 100%, puesto que el consumo de energía en la batería es de 900 Wh/km.

A la vista de esto, se decidió comprobar con la ayuda de una serie de investigadores del instituto CMT la validez de estos datos con el uso de la herramienta **GT Suite**, que permite simular prácticamente cualquier ciclo de circulación. Se comparó un **autobús con motor diésel**, para verificar la comparación, y posteriormente el mismo en versión eléctrica. Para el primer caso, con GT Suite se obtiene una energía en rueda de 1620 Wh/km y un consumo de 52 L/100 km. El diésel de referencia de este trabajo tiene la energía en rueda en 1400 Wh/km y el consumo viene fijado por datos SORT, que es de 45 L/100 km. La conclusión que se obtiene de esto es que, si bien la simulación Excel de este trabajo subestima la energía en comparación a GT Suite, usando como rendimiento medio del sistema de propulsión el calculado por GT Suite, el resultado de obtenido para el consumo de combustible es prácticamente el de homologación. Teniendo en cuenta que, como se ha dicho, en este trabajo el consumo en tanque es un dato verificado por un organismo internacional y funciona como dato de entrada, se puede considerar que el trabajo de la simulación es correcto.

Trabajar con el **autobús eléctrico** tiene más incertidumbre por el gran impacto que tiene el frenado regenerativo en su balance neto de energía en un ciclo. Al simular este autobús en GT Suite, los resultados son de 1219 Wh/km en rueda, con un rendimiento del frenado regenerativo del 82% y del sistema de propulsión batería-rueda del 91%. Si se aplican estos rendimientos, que son válidos al proceder de GT Suite, en la simulación Excel, el resultado de la energía en rueda es de 1215,3 Wh/km. Por tanto, se puede confirmar que los resultados del programa de simulación son correctos, al compararse con los de GT Suite.

A continuación, se adjuntan imágenes de los perfiles de potencia instantánea durante el ciclo en ambas simulaciones:

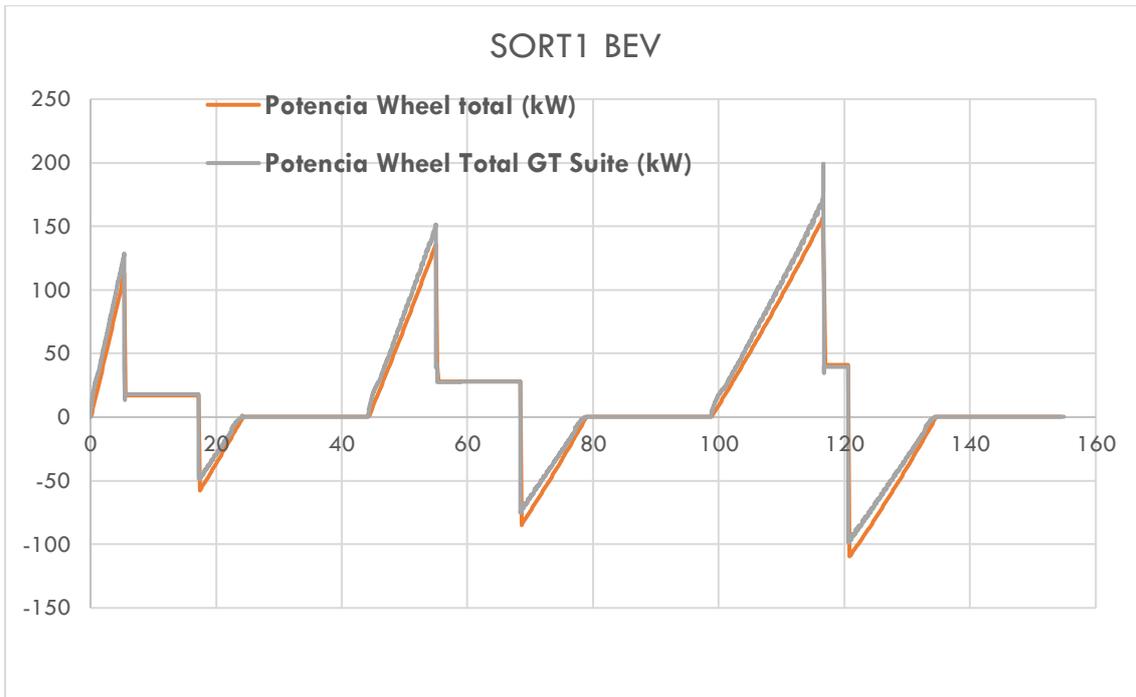


Figura 31: Perfiles de potencia en ambas simulaciones para un autobús eléctrico.

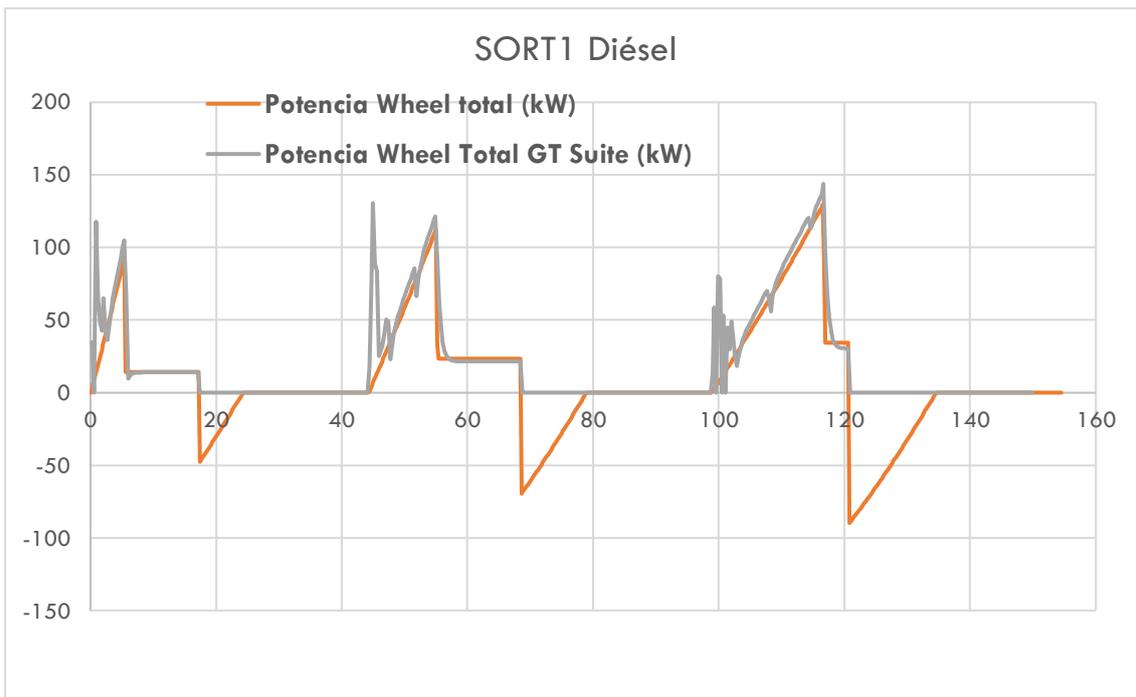


Figura 32: Perfiles de potencia en ambas simulaciones para un autobús diésel.

Como se puede observar, las gráficas son muy similares, y el error que se puede inducir es muy bajo. GT Suite presenta algunos picos adicionales debido a su mayor precisión y realismo, especialmente para el diésel donde este programa refleja cambios de velocidad, pero el balance final es prácticamente equivalente.

Sin embargo, el marco comparativo de este trabajo se basa en datos del ciclo SORT 1, y como elementos de entrada, no pueden ser modificados. Así que, con vistas a poder realizar una comparación justa, se han aplicado los rendimientos verificados con GT Suite al dato de entrada, para obtener un resultado aproximado de 800 Wh/km.

5.1.2 Energía necesaria en tanque

Si bien la mayor parte de estos datos ya han sido proporcionados, y por tanto no son resultados sino datos de entrada, resulta conveniente recopilarlos aquí porque se relacionan con muchos otros que se representan posteriormente. El resumen es el siguiente:

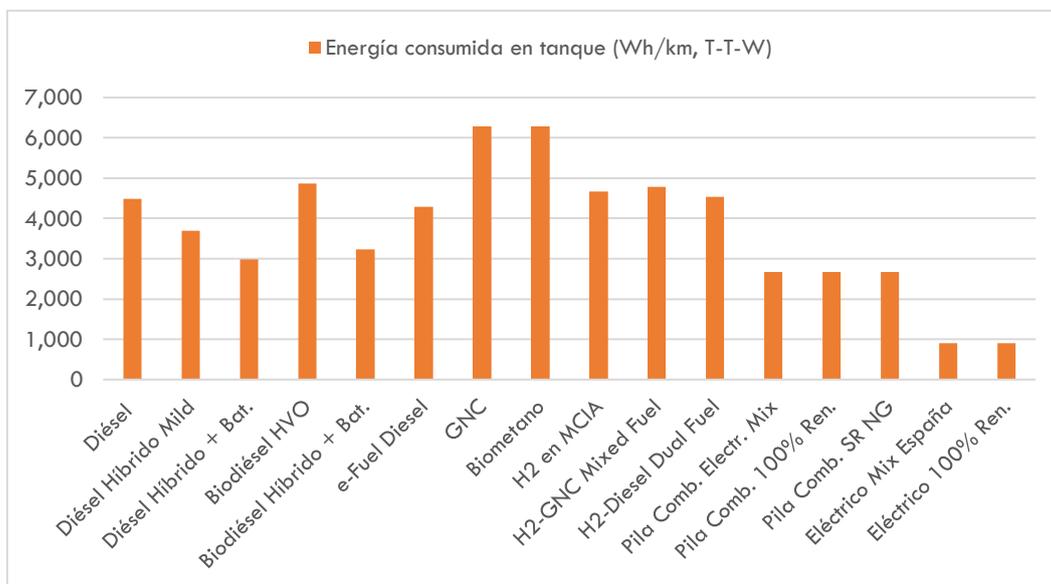


Figura 33: Energía consumida en tanque.

Todos los datos presentes ya estaban proporcionados, excepto uno: el hidrógeno en motor de combustión. El carácter altamente experimental y la escasez de prototipos funcionales dan como resultado la ausencia de datos fiables sobre consumos de combustible, y aún menos en el ciclo estandarizado SORT 1. Por tanto, para obtener su valor se ha optado por una vía alternativa.

Se parte del valor de energía necesaria en rueda, que ya ha sido calculado, y se tiene una horquilla de rendimientos del orden del 30-35%, aproximadamente. Estos valores son propuestos por el tutor, con la experiencia previa de otros trabajos del instituto CMT.

Para autobuses con motores de combustión interna alternativo, ya sea con combustible líquido o gaseoso, se debe cumplir que la relación entre la energía necesaria en rueda y la masa es de 0,1 kW/kg*km. Esto se cumple en los dos ejemplos representativos, el diésel y el GNC. Con ello se verifica que el valor de energía en rueda para el motor de combustión de hidrógeno es correcto. A partir de aquí, simplemente se ha estimado un valor de 14 kg/100 km, que permite que tanto el rendimiento como la relación descrita se cumplan de forma coherente.

5.1.3 Rendimiento equivalente del sistema de propulsión de tanque a rueda

Tras relacionar las dos energías por unidad de longitud anteriores, se obtienen los rendimientos equivalentes del sistema de propulsión de tanque a rueda:

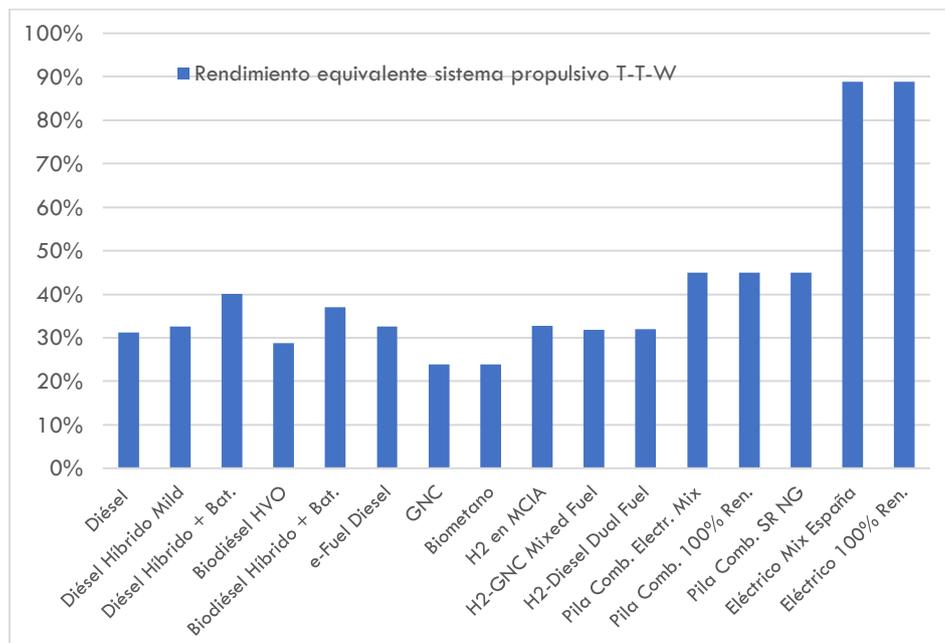


Figura 34: Rendimientos de los sistemas de propulsión.

En rasgos generales, se podía prever que el autobús eléctrico, por naturaleza propia, iba a tener los rendimientos de tanque a rueda más elevados de la comparativa (89%). Este hecho también se refleja en las alternativas híbridas (40% en *full*), que ven su rendimiento considerablemente mejorado con respecto a un diésel convencional o un biodiésel (~30%), y especialmente en la opción con pila de combustible de hidrógeno (45%), cuya propulsión es eléctrica, y su morfología se puede equiparar a un híbrido en serie o eléctrico de autonomía extendida.

Los sistemas con combustible gaseoso, de nuevo, penalizan su baja densidad. Mientras el hidrógeno consigue resultados similares en este aspecto a los de un diésel convencional, el GNC no supera el 25% de rendimiento, por su menor densidad energética.

5.1.4 Energía necesaria para la producción del combustible

Este valor se calcula con el uso de la energía consumida en tanque y el coeficiente de transferencia correspondiente (ETrans) que se ha explicado en el apartado 4.3. Por tanto, las energías consumidas en la fabricación de cada combustible son las presentes:

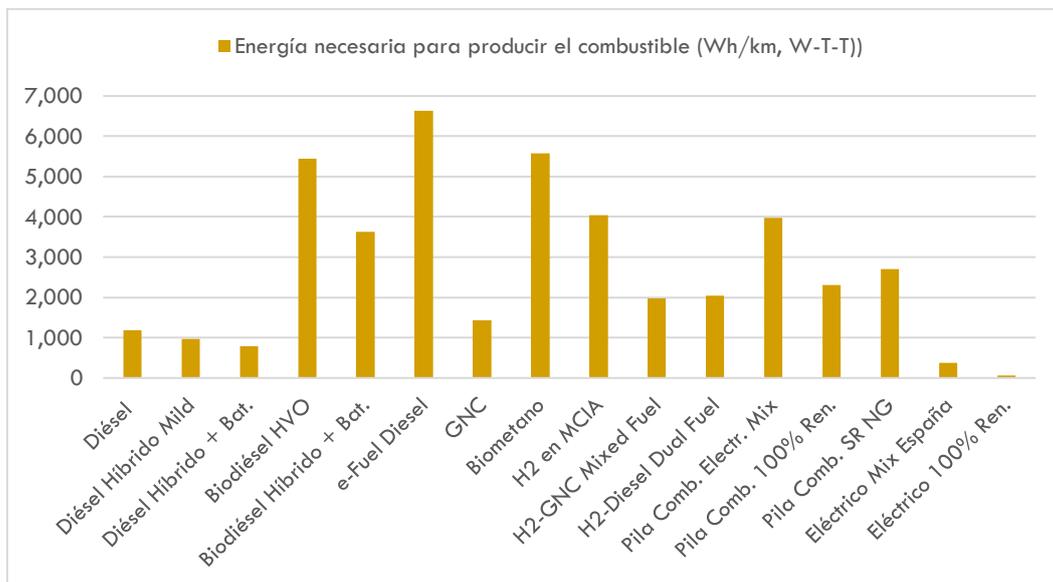


Figura 35: Energía necesaria para la fabricación de los combustibles.

Los homónimos sintéticos o más sostenibles de los combustibles fósiles son los que más energía requieren en sus procesos de fabricación. Estos son el biodiésel y el e-fuel respecto del diésel, y el biometano respecto del GNC.

El impacto según el modo de obtención del hidrógeno es fácilmente comparable con el autobús de pila de combustible, ya que supone el mismo marco de comparación. Consume más energía fabricar el hidrógeno mediante mix eléctrico que usando electricidad renovable, porque esta última se obtiene directamente con máquinas que la transforman desde la naturaleza, y no con procesos intermedios u otros combustibles. La opción de reformado se sitúa entre estas dos.

La citada diferencia entre los dos orígenes de electricidad se refleja en el eléctrico a baterías, aunque su poca energía consumida en tanque les beneficia en este aspecto.

5.1.5 Energía primaria total por unidad de longitud

A modo de resumen, en este espacio se integran las energías consumidas en tanque y en la producción del combustible. Es decir, toda la energía que se consume desde el

inicio del proceso de fabricación del combustible hasta que se ha usado en el autobús, para ser transformado en energía en las ruedas.

Como se ha comentado en líneas superiores, se destacan negativamente en este aspecto los combustibles homólogos de fósiles, que requieren de grandes cantidades de energía en sus procesos de fabricación. Especialmente llamativo es el caso del biometano, que además de en el proceso de fabricación es el que más consumo en tanque tiene, con igual valor al GNC.

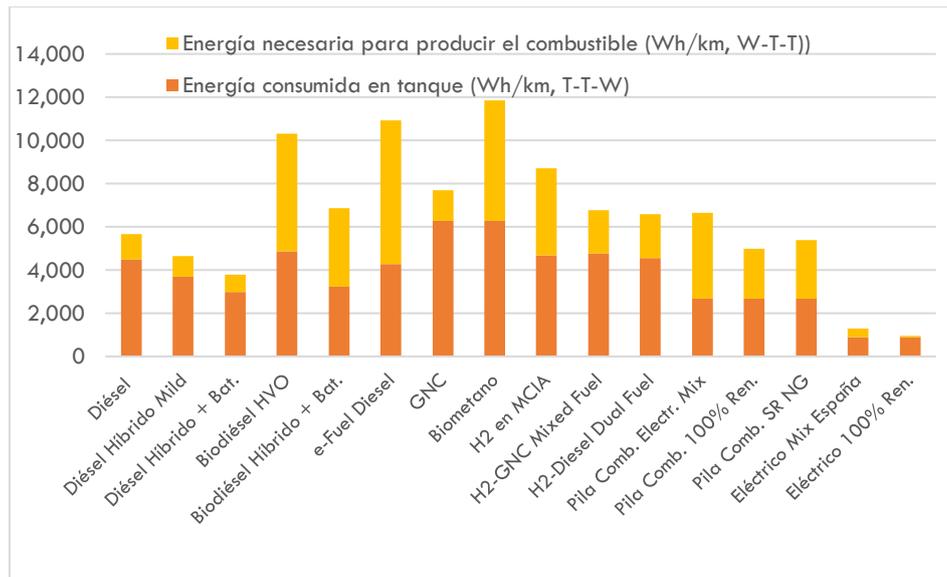


Figura 36: Energía primaria consumida por unidad de longitud.

5.2. Emisiones de CO₂ por unidad de longitud

5.2.1 Emisiones de CO₂ directas

Estas emisiones corresponden a las que produce el propio vehículo en su funcionamiento, las tradicionalmente llamadas "en el escape". Se calculan aplicando los correspondientes coeficientes de emisión a la energía consumida en tanque.

En este aspecto, sólo los autobuses urbanos propulsados por combustibles fósiles tienen emisiones directas. Estas van estrechamente relacionadas, efectivamente, con sus consumos en tanque, y se ve reflejada la actuación de los sistemas híbridos con respecto a su variante convencional. También se ven beneficiados los sistemas con combustible dual, ya que el hidrógeno no puede emitir CO₂ en su funcionamiento. El valor más elevado corresponde al GNC, que tiene un elevado consumo en tanque, y por tanto también emisiones.

Aunque un autobús con biometano o diésel sintético tiene emite CO₂, no se contabiliza porque sus emisiones netas son nulas. Lo que emiten es el CO₂ que se ha recogido en su fabricación.

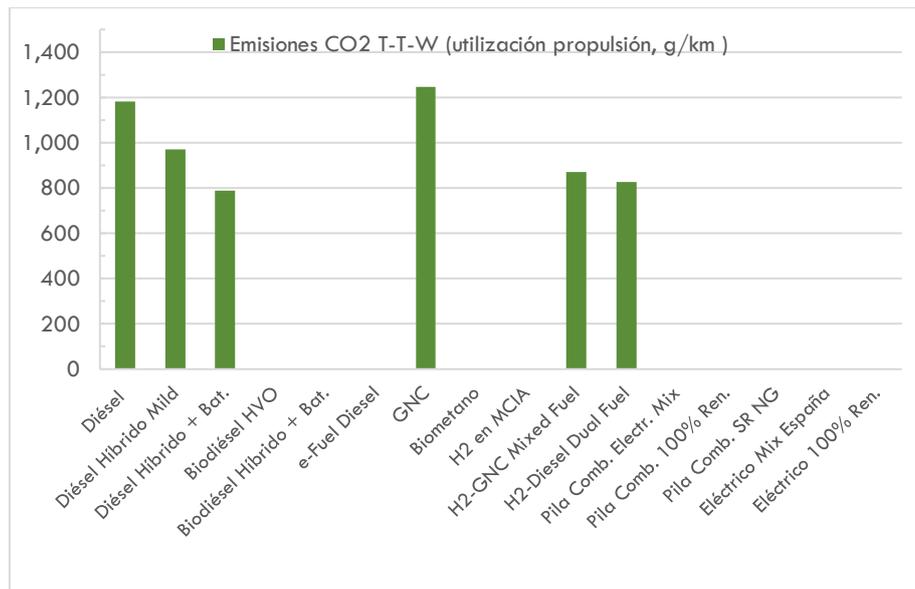


Figura 37: Emisiones de CO2 directas.

5.2.2 Emisiones de producción del combustible

Al igual que el caso anterior, estas emisiones se calculan aplicando coeficientes de emisión, pero en este caso a la energía necesaria para la producción del combustible.

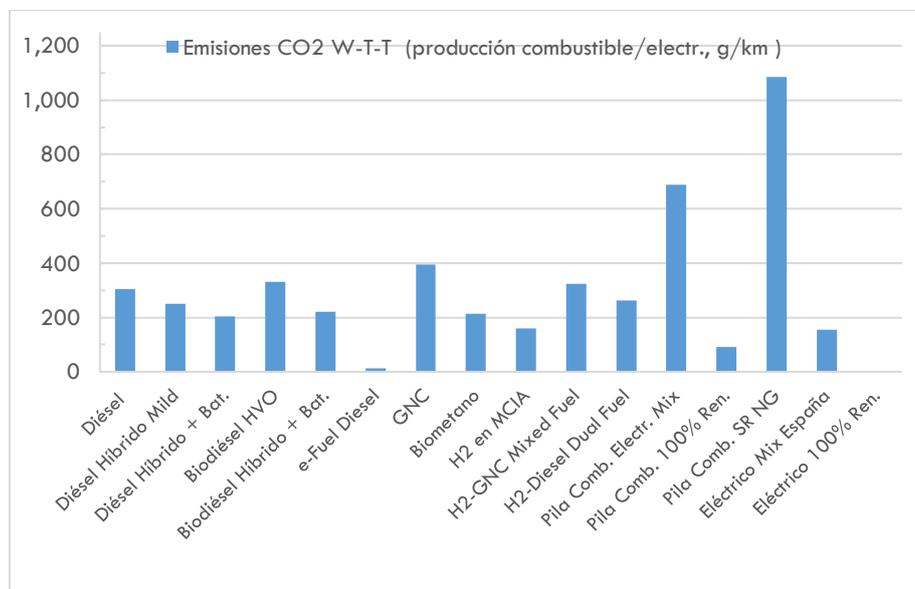


Figura 38: Emisiones en fabricación del combustible.

La producción del hidrógeno mediante reformado de gas natural tiene unas emisiones muy elevadas. Entre las alternativas con uso de energía eléctrica, las opciones con el Mix se ven penalizadas por el uso parcial de energías no renovables, con contenido incluso de centrales de carbón.

5.2.3 Emisiones de fabricación del autobús

Estas emisiones ya se han calculado en la tabla 9 del apartado 4.6, pero cuantificadas por autobús, y no por unidad de longitud. Para equipararlas al resto de emisiones presentadas, se dividen los valores obtenidos por el recorrido total en vida. El recorrido diario son 200 km, a 260 días laborales por año, lo que son 52.000 km anuales. Suponiendo una vida media de unos 12 años, que es un valor realista, aunque cada año crece, resulta un recorrido total en vida de 624.000 km. Para este recorrido, las emisiones por km de cada autobús son:

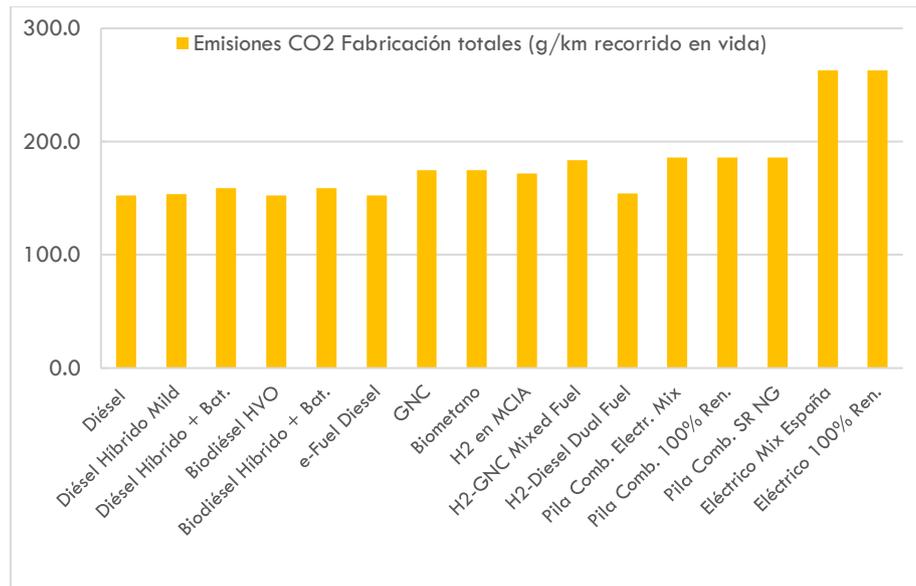


Figura 39: Emisiones debidas a la fabricación del autobús.

Como se puede apreciar, la fabricación de las baterías afecta mucho a los autobuses eléctricos. Otras alternativas también usan estos componentes, pero en capacidades mucho más reducidas, pero aún así también se observa al comparar el autobús diésel tradicional con las hibridaciones.

5.2.4 Emisiones de CO₂ totales

Estas emisiones llamadas *Cradle-to-Grave* (Cuna a Tumba), son la suma de todas las emisiones que se han detallado en este apartado. Representan todas las emisiones que provoca un autobús durante toda su vida, incluyendo la fabricación, la utilización, y el final de vida útil del vehículo.

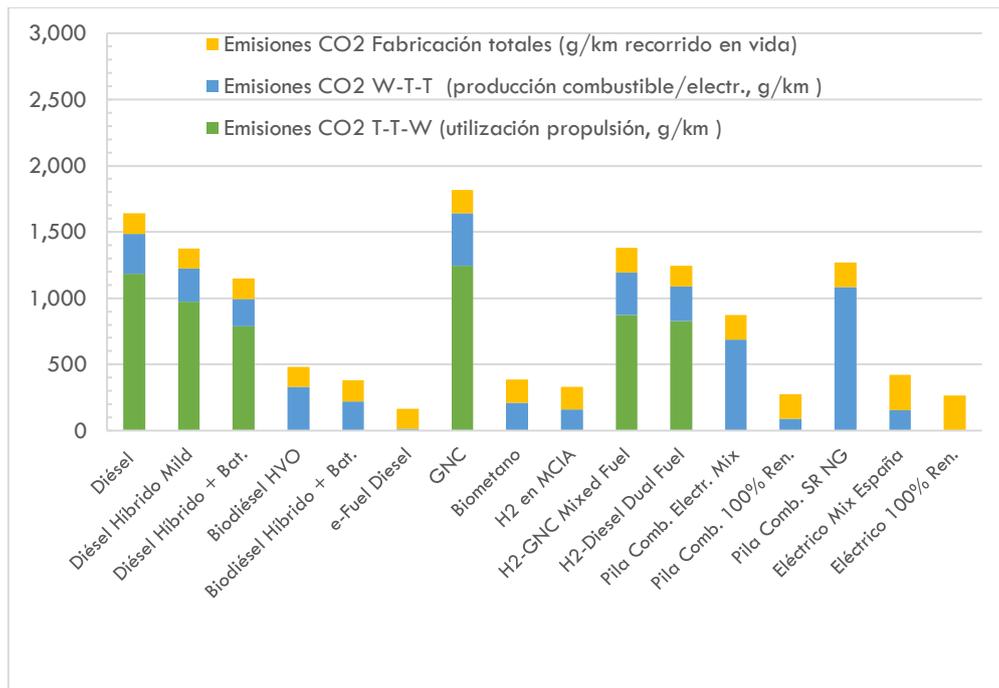


Figura 40: Emisiones totales.

Al observar desde esta perspectiva cada tipo de emisiones, se puede valorar mejor el impacto de cada una. Las alternativas que no emiten directamente CO_2 , como pueden ser los autobuses eléctricos o con pila de combustible, se veían peor valorados al calcular las emisiones de fabricación. Sin embargo, la influencia de estas últimas es bajo al considerarlas por km recorrido, por la elevada cantidad de kilometraje que acumulan estos vehículos durante toda su vida útil.

Son escasas también las emisiones del autobús con diésel sintético, biometano e hidrógeno en MCIA. En los dos primeros casos, porque utilizan CO_2 que de otro modo sería emitido a la atmósfera, y en el último porque no hay carbono en su reacción.

Las opciones que más emiten son el diésel, GNC y sus derivados, ya sea con hibridación o combinación del combustible con hidrógeno. Estas dos técnicas permiten reducir sustancialmente el dióxido de carbono producido, pero las tecnologías con base en combustibles fósiles siguen viéndose perjudicadas en este aspecto.

5.3. Masas y volúmenes de almacenamiento de cada alternativa

5.3.1 Masas de los sistemas de almacenamiento

Caracterizar las masas de los sistemas de almacenamiento es fundamental para la comprensión de las fortalezas y debilidades de cada método de propulsión. Tal y como se ha mencionado anteriormente, la masa tiene un gran impacto en el cálculo de la

energía en rueda, y ello ocasiona fluctuaciones en multitud de parámetros importantes. Además, si bien no se calcula, es sabido que evidentemente también tiene mucha influencia en el consumo en tanque, y por tanto, al combinar estos dos aspectos, en todos los ítems analizados en 5.1 y 5.2. Las masas de todas las alternativas, en cuanto a propulsión, son:

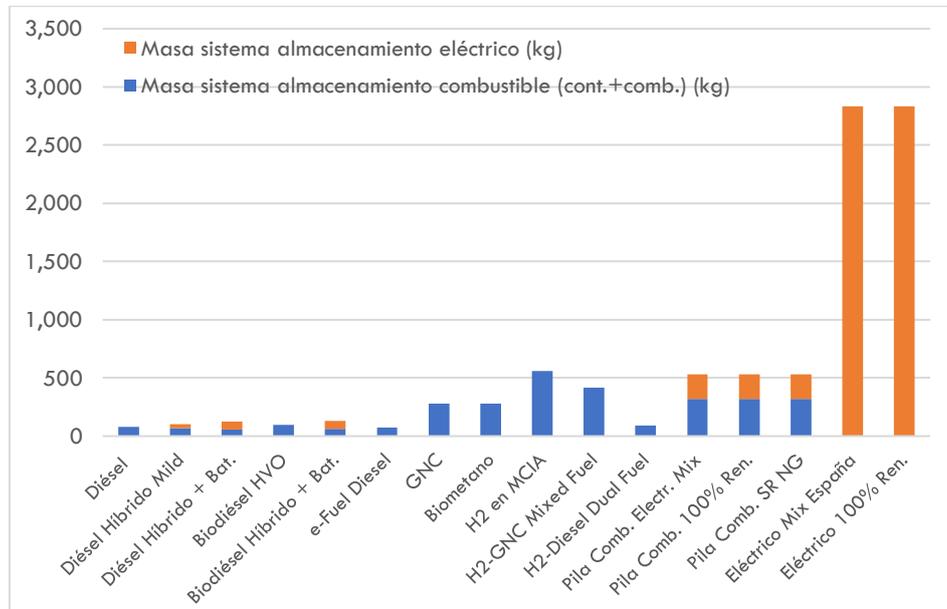


Figura 41: Masas totales de los sistemas de almacenamiento.

En primer lugar, los elementos que más masa añaden a un autobús son las baterías. Para almacenar una buena cantidad de energía, estas deben tener masas del orden de las 3,5 toneladas. Totalmente opuesto es el caso de los combustibles líquidos, cuyos depósitos no superan el centenar de kg. Las opciones híbridadas no tienen masas muy superiores porque las baterías son mucho más compactas.

Los depósitos de combustibles gaseosos son considerablemente más pesados que los líquidos, debido a que su contenido se almacena a presión. Ello comporta que deban estar muy reforzados, para evitar cualquier tipo de accidente. Como el hidrógeno se almacena a mayor presión que el GNC (350 bares contra 200), tiene aún mayor masa.

Por último, los autobuses con pila de combustible de hidrógeno se sitúan en un orden de magnitud similar al hidrógeno en MCIA. Esto es debido a que su depósito de H₂ es más pequeño, ya que el rendimiento de la pila es mucho mayor al MCIA. Esa diferencia se ve compensada por la presencia de baterías, que al final equilibran la balanza.

5.3.2 Volúmenes de los sistemas de almacenamiento

En cierto modo, los volúmenes de almacenamiento van muy relacionados con las masas, aunque algunas diferencias entre alternativas pueden verse ampliadas o disminuidas. Unos volúmenes bajos permiten tener más capacidad de pasajeros, cosa que resulta de interés especialmente en ciudades muy colapsadas. Ya que estos vehículos ocupan un gran espacio en la vía, este debe ser lo más útil posible. Los datos son los siguientes:

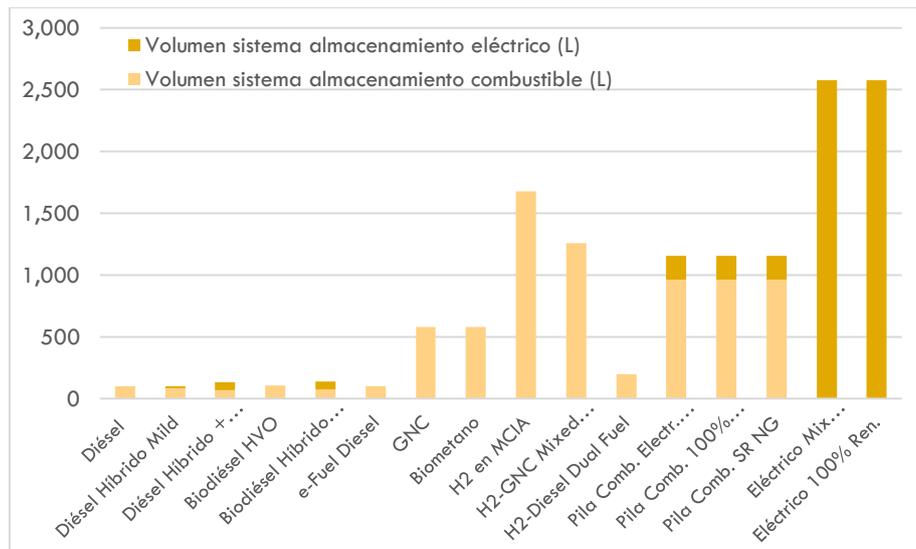


Figura 42: Volúmenes totales de los sistemas de almacenamiento.

Si bien las baterías tenían un gran impacto en la masa, en el volumen este efecto no está tan pronunciado. Los autobuses eléctricos siguen siendo los peor parados, pero la alta densidad de las baterías acorta las diferencias.

De hecho, en relación a la densidad, resulta muy baja en el almacenamiento de hidrógeno. Este elemento, precisamente es muy poco denso, y almacenar una cantidad suficiente implica un volumen ocupado alto. Al comparar el hidrógeno en MCIA y la pila de combustible, si bien en cuanto a masa estaban en valores similares, en volumen ocupado debido al menor consumo de hidrógeno y el uso de baterías búfer es más beneficioso en los segundos frente a los primeros.

En cuanto al resto de combustibles, se mantiene el orden ya visto para las masas. Los mejores en este dato son los autobuses diésel y homólogos, con poco impacto de las baterías en las opciones híbridas, seguidas por el GNC y biometano, que se sitúan en un punto medio entre los diésel e hidrógeno.

5.4. Costes de las alternativas de propulsión

Si bien hasta el momento no se había hablado de costes más allá de los precios de adquisición de los autobuses, cabía reservar un espacio para el apartado económico, ya que es un ítem más de comparación y puede resultar esencial según los criterios particulares. Al igual que los consumos de energías y emisiones, los costes se han cuantificado por km recorrido, de manera que se pueden escalar según el caso particular.

5.4.1 Coste de combustible/electricidad

Este es el coste más "directo" a la hora de poner en funcionamiento el vehículo. Para calcularlo, se usan los consumos presentes en el capítulo 3.8, a los que se les aplica el coste de cada combustible. Estos últimos son los siguientes:

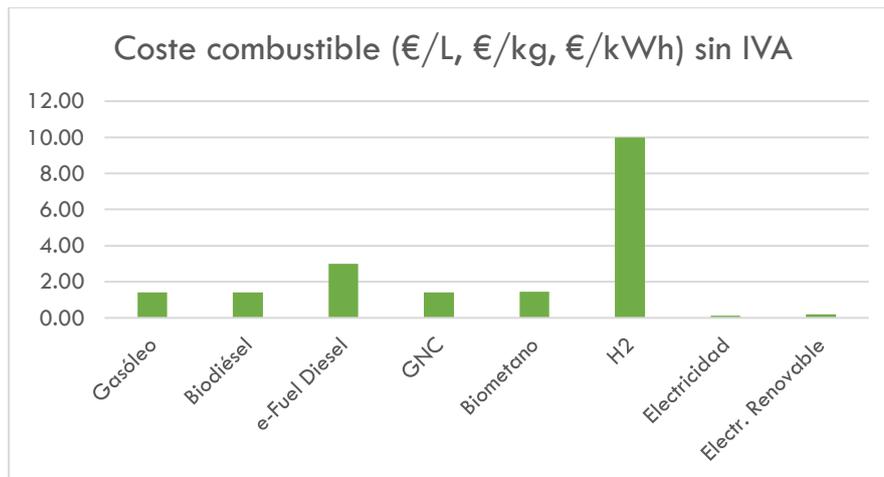


Figura 43: Costes de cada combustible.

Al aplicar estos costes a los consumos en tanque de cada alternativa, y dividir por 100 para obtener los datos por cada km recorrido, los resultados son los que se presentan en la posterior figura:

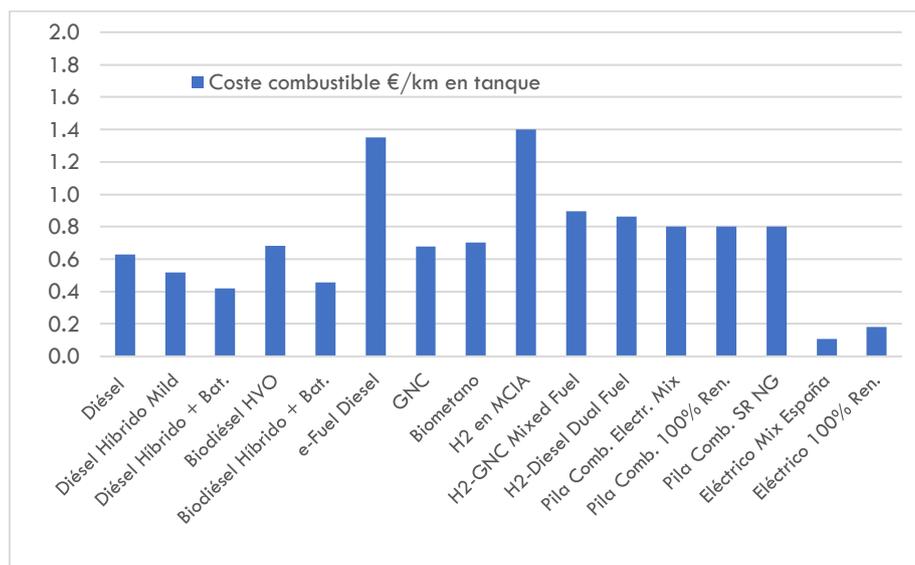


Figura 44: Coste por km en la vida de cada autobús.

Los dos combustibles más caros, debido a su condición altamente experimental, son el diésel sintético y el hidrógeno. Este último se ve menos favorecido al aplicarse en el motor de combustión interna alternativo por su menor rendimiento frente a la pila de combustible con propulsión eléctrica.

5.4.2 Coste de mantenimiento

Los datos de costes de mantenimiento por distancia recorrida provienen de la EMT en su gran mayoría, excepto los casos de autobuses con pila de combustible y eléctrico a batería, cuya información fue proporcionada por el TMB (Transports Metropolitans de

Barcelona). Incluyen un cambio de batería en la vida útil del vehículo, para los eléctricos, hidrógeno en pila de combustible y *full-hybrid*.

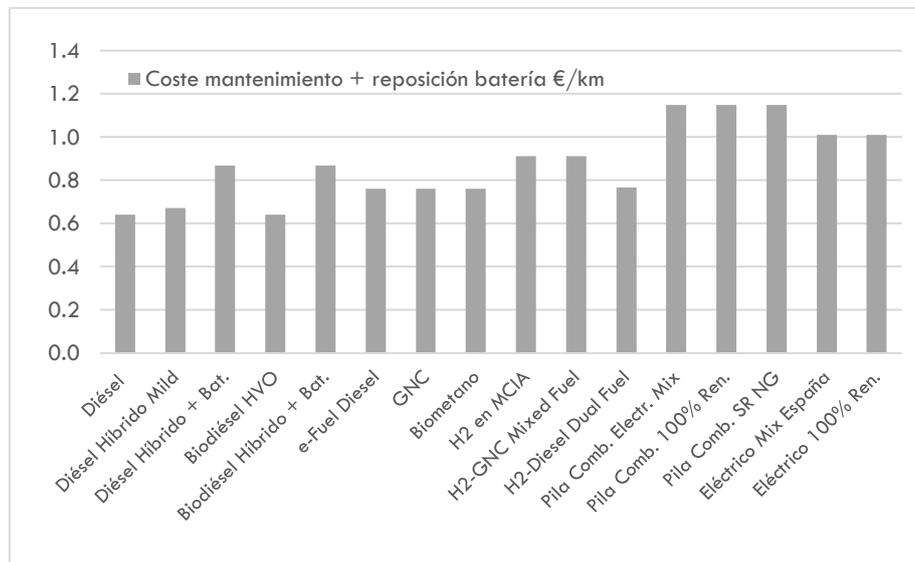


Figura 45: Costes de mantenimiento.

Los mayores costes de mantenimiento vienen de parte de los autobuses eléctricos y con pila de combustible. A continuación de estos, se encuentra el hidrógeno en MCIA. Al ver esto, se puede intuir que los sistemas eléctricos y de almacenamiento de hidrógeno provocan altos costes en este aspecto. Por ello se ve tan penalizado el sistema de pila de combustible, y se aprecia el impacto de los híbridos y combustibles duales respecto a sus alternativas convencionales.

Los vehículos con GNC tienen más mantenimientos que los diésel tradicionales, aunque la diferencia no es muy elevada. El diésel sintético se sitúa en el mismo orden que el GNC. Resulta especialmente importante en este gráfico recalcar que estos costes son por km, y con los altos kilometrajes que realizan estos autobuses durante su vida útil, una pequeña diferencia se magnifica al final de sus días.

5.4.3 Coste de amortización

De todos los costes, este tiene la menor magnitud, pero no por ello debe ser omitido. El coste de amortización se calcula como la diferencia del valor de compra y el residual, dividido entre los km recorridos en su vida para obtener el valor por unidad de longitud recorrida. Se recuerda que el kilometraje en vida para 12 años es de 624.000 km. En estos autobuses, se ha considerado que el valor residual es nulo, porque se suelen estirar hasta el fin de su vida útil, y una vez se retiran del servicio, son achatarrados o donados a empresas de transporte con bajos recursos, no se obtiene ningún tipo de beneficio económico. Dicho esto, los resultados son los siguientes:

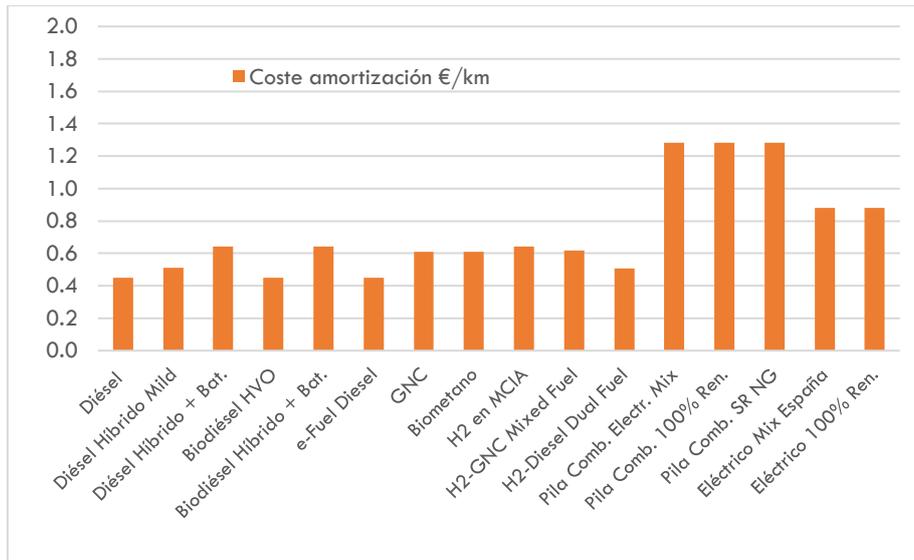


Figura 46: Costes de amortización.

Como el valor residual es nulo, en este caso concreto el coste de amortización no es más que un reflejo del coste de adquisición del vehículo. Al igual que en este último, las alternativas más baratas son las tradicionales, el diésel, GNC y sus derivados. La más cara es el sistema de pila de combustible, seguido del eléctrico con baterías.

5.4.4 Costes totales (TCO, Total Cost of Operation)

Al igual que se ha hecho con parámetros previos, aquí se engloban todos los costes para apreciar de forma sencilla cuáles son las diferencias entre cada sistema de propulsión.

El resumen es el siguiente:

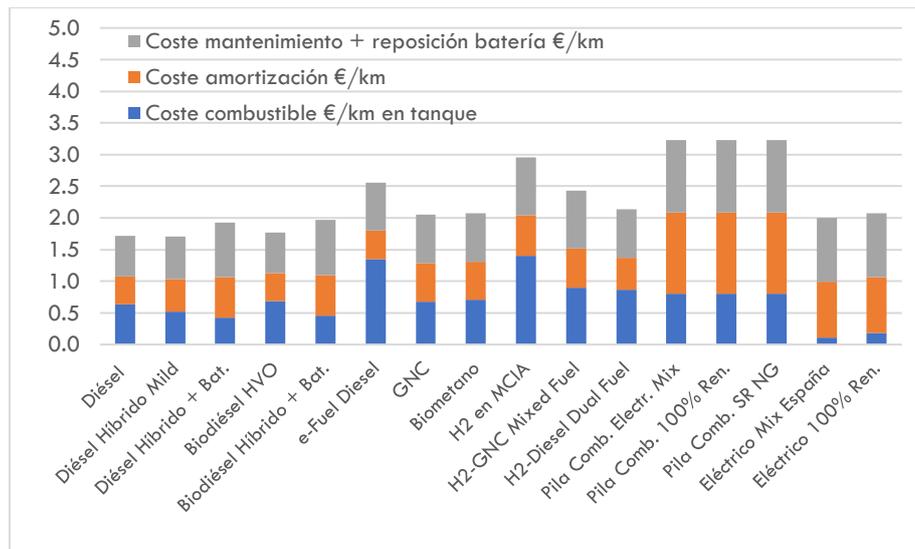


Figura 47: Coste total de operación.

Tras agrupar todos los costes, las reflexiones son similares a las de los gráficos previos. Los sistemas con hidrógeno como combustible son los más caros de tener en propiedad, especialmente cuando se usa pila de combustible. Por debajo se encuentra el diésel sintético, los combustibles duales, el GNC/biometano y el eléctrico a baterías. Las opciones más baratas corresponden al diésel tradicional y sus variantes.

5.5. Comparación cualitativa de alternativas de propulsión

Debido a la naturaleza de este trabajo, el método más adecuado para valorar las alternativas es utilizando un método cualitativo, al igual que se ha realizado en los trabajos de Chiralt [1] y Lloret [2]. Este método consiste en valorar cada sistema de propulsión del 1 al 10, siendo 1 muy desfavorable y 10 muy favorable, en cuanto a los **criterios** que se han detallado en este capítulo 5.

Estos criterios son: **energía primaria consumida, emisiones de CO₂ directas, emisiones de CO₂ totales, masa de almacenamiento, volumen de almacenamiento, y coste total de propiedad.** La Tabla 10 con las valoraciones es la que aparece en la página siguiente.

Al analizar la tabla, se puede notar que no existe una alternativa claramente superior con respecto a las otras. Esto se debe a que cada alternativa destaca en ciertos aspectos, mientras que se penaliza en otros, por lo que el balance global de cada una depende de los criterios que cada agente considere como esenciales.

Tabla 10: Valoración cuantitativa en diversos parámetros de cada alternativa.

Sistema de propulsión	Masa Almacenamiento	Volumen Almacenamiento	Energía 1ª Consumida W-T-W	Emisiones CO2 Directas T-T-W	Emisiones CO2 Totales C-T-G	Coste Total Propiedad
Diésel	10	10	6	1	2	10
Diésel microhíbrido	9	10	7	2	3	10
Diésel full-hybrid	8	8	8	3	4	8
Biodiésel HVO	9	9	3	10	7	9
Biodiésel full-hybrid	8	8	5	10	8	8
e-Fuel Diesel	10	10	2	10	10	3
GNC	7	6	4	1	1	6
Biometano	7	6	1	10	9	6
H2 MCIA	5	4	3	10	9	2
Dual H2-GNC	6	5	5	3	3	4
Dual H2-Diésel	9	7	5	4	4	5
Pila Comb. Electr. Mix	3	3	5	10	5	1
Pila Comb. 100% Ren.	3	3	7	10	9	1
Pila Comb. SR NG	3	3	6	10	4	1
Eléctrico Mix España	1	1	10	10	8	7
Eléctrico 100% Ren.	1	1	10	10	9	6

Si mantener acotada la **masa y volumen de almacenamiento** (e indirectamente del bus completo) es crucial, las alternativas que destaca es el autobús diésel y sus homónimos biodiésel y e-fuel. La hibridación tiene un impacto relativamente bajo, especialmente la microhibridación.

En el caso de que se valore un bajo **consumo de energía primaria**, la opción más favorable es el autobús eléctrico a baterías. Los casos de hibridación, en este modelo de transporte urbano, también se ven bien valoradas.

Para los dos ítems referidos a **emisiones de CO₂** que se han considerado (T-T-W y C-T-G), los resultados son similares, pero como se ha remarcado más arriba, se ha querido detallar de esta forma para ver las emisiones directas T-T-W, y para aclarar que no todas las emisiones corresponden sólo a la fase de funcionamiento del autobús.

En estos parámetros los vehículos eléctricos a baterías salen bien parados, pero también los derivados de autobuses tradicionales con combustibles más sostenibles, es decir, H₂, biometano, biodiésel y diésel sintético, especialmente este último, que tiene la mejor valoración combinada. Los métodos tradicionales con diésel y, en mayor medida, GNC, emiten mucho más dióxido de carbono.

Por último, en cuanto al **coste de utilización del autobús**, los autobuses diésel tradicionales resultan los más económicos. La microhibridación tiene un coste muy bajo, e incluso se ofrece como un equipamiento opcional más que como una motorización separada de la gama. El biodiésel resulta ligeramente más caro, seguido del eléctrico a baterías y el GNC. Con los años, los autobuses eléctricos han ido reduciendo sus costes, como era de esperar. Los vehículos más caros son los que utilizan pila de combustible, hidrógeno en MCIA y diésel sintético, en ese orden. Estos combustibles son muy caros por su carácter experimental, y en el primer caso se suma su elevado precio de adquisición.

6. Conclusiones

En el trabajo recogido en esta memoria, se han **evaluado y comparado las alternativas de propulsión** existentes para **autobuses urbanos** mediante un procedimiento especialmente desarrollado para ello. Para ello, en primer lugar, se ha identificado un **recorrido estandarizado representativo** de los recorridos de los autobuses urbanos, el recorrido **SORT 1** definido por la **UITP**. Además, las distancias recorridas en vida de dichos autobuses han sido corroboradas con la EMT de València.

En segundo lugar, y el que ha sido el pilar de este trabajo, se ha realizado una **simulación** de las mencionadas condiciones de operación de los autobuses urbanos. Esto ha permitido **calcular los resultados específicos** para cada opción de propulsión de autobús y asegurar su exactitud. Los resultados de **consumo de combustible o de electricidad** obtenidos en las simulaciones se han **validado con datos certificados** de modelos concretos de autobús, obtenidos por diversos laboratorios oficiales internacionales, correspondientes al mismo ciclo de la UITP.

Por último, se ha recabado una gran cantidad de datos de fabricantes y otros estudios, lo que han posibilitado la caracterización de las **masas de los autobuses y sus sistemas de propulsión**, así como los **volúmenes** de estos últimos, incluyendo de forma especial los sistemas de almacenamiento específicos, y los **costes** asociados de funcionamiento. Todo lo mencionado se ha recogido, ordenado y comparado de forma sistemática en forma de tablas y gráficos para las distintas opciones de propulsión.

Como **conclusión general**, se puede decir que no existe la solución de propulsión ideal, y que, según los criterios que se consideren más importantes, unas opciones pueden ser más convenientes que otras en según qué situación.

Sugerencias para trabajos futuros

Mientras se elaboraba el presente trabajo, han ido surgiendo ciertas ideas, ya sea por inspiración o por afrontar algún problema específico. De hecho, este documento aplica anotaciones de desarrollos futuros provenientes de los trabajos previos ya citados, y por tanto estas ideas serían beneficiosas para siguientes compañeros.

Las sugerencias son las siguientes:

- Calcular el impacto de las **pérdidas de energía** en los sistemas de recarga eléctrica.
- Desarrollar un modelo de cálculo específico de autobús **híbrido en serie**, y no englobarlo en "*full-hybrid*".
- Valorar el coste de la infraestructura de **producción de energía** eléctrica.

Bibliografía

- [1] R. Chiralt, «Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos en el Puerto de Valencia», Universitat Politècnica de València, València, 2023. Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/194138/Chiralt%20-%20Evaluacion%20de%20alternativas%20de%20propulsion%20descarbonizada%20para%20embarcaciones%20Aplicacion%20a....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] M. Lloret, «Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para vehículos de transporte terrestre de mercancías. Proyecto de una metodología para empresas del sector.», Universitat Politècnica de València, València, 2024. Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/202716/Lloret%20-%20Evaluacion%20de%20alternativas%20de%20propulsion%20descarbonizada%20para%20vehiculos%20de%20transporte%20ter....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] «Objetivos y metas de Desarrollo Sostenible», Organización de las Naciones Unidas. Accedido: 21 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [4] «Carburantes», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/carburantes.html>
- [5] «¿Cuáles son los diferentes tipos de combustibles para coches? | Noticias | Home», España. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bp.com/es_es/spain/home/noticias/blog/-cuales-son-los-diferentes-tipos-de-combustibles-para-coches-.html
- [6] J. Benajes, A. García, J. Monsalve-Serrano, y S. Martínez-Boggio, «Optimization of the parallel and mild hybrid vehicle platforms operating under conventional and advanced combustion modes», *Energy Convers. Manag.*, vol. 190, pp. 73-90, jun. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.04.010.
- [7] «Pilas de Combustible», Centro Nacional del Hidrógeno. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [8] R. Edwards, V. Mahieu, J.-C. Griesemann, J.-F. Larivé, y D. J. Rickeard, «JEC Well-To-Wheels report v5: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context», presentado en 2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, jun. 2004, pp. 2004-01-1924. doi: 10.4271/2004-01-1924.
- [9] F. V. Tinaut, «METODOLOGÍA USADA EN INFORME JEC W-T-W V5, MÁSTER INGENIERÍA AUTOMOCIÓN, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID». 2020.
- [10] «Ley 1/2014, de 17 de noviembre, de Transporte de Viajeros por Carretera.».

- [11] «Los autobuses y autocares. Una clasificación de vehículos de transporte muy variados.», madridmobilite. Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://madridmobilite.com/2019/08/18/los-autobuses-y-autocares-una-clasificacion-de-vehiculos-de-transporte-muy-variados/>
- [12] «Solaris expondrá en Busworld el autobús articulado de hidrógeno», autobusesyautocares. Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autobusesyautocares.com/texto-diario/mostrar/4408467/solaris-expondra-busworld-autobus-articulado-hidrogeno>
- [13] Fundación Mapfre, «Seguridad en autobuses. Cuatro factores para un transporte seguro.» [En línea]. Disponible en: <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/pt/media/grup/1097121.do>
- [14] «Vehículo a motor de dos ejes | Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/transporte-terrestre/inspeccion-y-seguridad-en-el-transporte/pesos-y-dimensiones/pesos/pesos-vehiculos-de-motor/vehiculo-a-motor-de-dos-ejes>
- [15] EMT Valencia, «Memoria 2022». [En línea]. Disponible en: <https://www.emtvalencia.es/ciudadano/images/stories/pdf/PortalTransparencia/Memoria2022.pdf>
- [16] EMT Valencia, «Modelos». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.emtvalencia.es/ciudadano/index.php?option=com_content&view=article&id=142&Itemid=151&lang=es
- [17] Mercedes-Benz Bus, «Mercedes Citaro». [En línea]. Disponible en: https://www.mercedes-benz-bus.com/es_ES/models/citaro/facts/facts-citaro.pdf
- [18] «Mercedes-Benz Autobuses y autocares: Citaro: Citaro hybrid». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mercedes-benz-bus.com/es_ES/models/citaro/citaro-hybrid.html
- [19] TÜV SÜD Auto Service GmbH, «Test Report Mercedes Citaro Hybrid.»
- [20] «Irisbus - Citelis». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iveco.com/Documents/Irisbus/Irisbus-Citelis.html>
- [21] «GR Corolla H2, primero del mundo en competir con combustible de hidrógeno líquido», GR Corolla H2, primero del mundo en competir con combustible de hidrógeno líquido. Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://prensa.toyota.es/gr-corolla-h2-primero-del-mundo-en-competir-con-combustible-de-hidrogeno-liquido/>

- [22] «Nuevo Corolla Cross Hydrogen, la apuesta por el hidrógeno de Toyota - Labasa Toyota | Concesionario Toyota en Murcia y Cartagena». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.toyotalabasa.com/nuevo-corolla-cross-hydrogen/>
- [23] «Smart. Simple. Sustainable. | KEYOU H2 Mobility as a Service». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.keyou.de/solutions>
- [24] Caetano Bus, «Presentación Caetano H2.City Gold». [En línea]. Disponible en: https://caetanobus.pt/wp-content/uploads/2019/10/H2.City-Gold_ESP.pdf
- [25] R. Caponi, A. Monforti Ferrario, L. Del Zotto, y E. Bocci, «Hydrogen refueling stations and fuel cell buses four year operational analysis under real-world conditions», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, n.º 54, pp. 20957-20970, jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.093.
- [26] MAN Truck & Bus SE, «MAN Lion's City E | MAN ES». Accedido: 15 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.man.eu/es/es/autobuses/el-man-lion_s-city/sistema-de-propulsion-electrica/man-lion_s-city-e.html
- [27] EVFF, «E-SORT Man Lion's City 12E».
- [28] Iveco SpA, «Hoja de especificaciones Iveco Urbanway Full-Hybrid». [En línea]. Disponible en: https://www.iveco.com/ivecobus/es-es/collections/technical_sheets/Documents/Iveco_Bus_Update/Urbanway/Urbanway_Hibrido_12m.pdf
- [29] W. Gis, S. Kruczyński, S. Taubert, y A. Wierzejski, «Studies of energy use by electric buses in SORT tests», *Combust. Engines*, vol. 170, n.º 3, pp. 135-138, ago. 2017, doi: 10.19206/CE-2017-323.
- [30] D. Doyle, A. Harris, S. Chege, L. Douglas, J. Early, y R. Best, «Hydrogen Fuel Cell Buses: Modelling and Analysing Suitability from an Operational and Environmental Perspective», presentado en WCX SAE World Congress Experience, abr. 2020, pp. 2020-01-1172. doi: 10.4271/2020-01-1172.
- [31] «Hydrogen City Bus 12.4m - Foton Mobility Distribution Australia». Accedido: 11 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fotonmobility.com.au/hydrogen-city-bus-12-4m>
- [32] Transports Urbans de Sabadell, «Procedimientos: Licitaciones en curso». Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tus.es/index.php/es/tus/perfil-del-contractant>
- [33] R. Edwards, V. Mahieu, J.-C. Griesemann, J.-F. Larivé, y D. J. Rickeard, «JEC Well-to-Tank report v5: Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context», presentado en 2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition, jun. 2004, pp. 2004-01-1924. doi: 10.4271/2004-01-1924.



- [34] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Sitio web del Hidrógeno», Sitio web del Hidrógeno. Accedido: 27 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html>
- [35] A. Elgowainy y Argonne National Laboratory, «GREET Model for Hydrogen Life Cycle GHG Emissions»,

PRESUPUESTO

Para facilitar la comprensión, el presupuesto se ha elaborado en dos partes: primero, se detalla el coste de la mano de obra, para después aplicar el valor total al coste de herramientas, gastos generales y beneficio industrial, con la consiguiente obtención del importe final.

Los costes de cada mano de obra corresponden a las retribuciones mínimas correspondientes en la Universitat. Para el estudiantado, en régimen de prácticas, se estipuló un valor de 4,6 euros por hora, tal y como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 11: Coste de mano de obra.

Concepto	Coste unitario (€/h)	Unidades (h)	Importe (€)
Investigación sobre las alternativas de propulsión	4,60 €	40	184,00 €
Desarrollo de la simulación de los ciclos SORT	4,60 €	20	92,00 €
Cálculo e integración de los resultados obtenidos	4,60 €	15	69,00 €
Confección de tablas resumen y gráficos	4,60 €	10	46,00 €
Revisión y resolución de problemas	4,60 €	35	161,00 €
Redacción del trabajo	4,60 €	40	184,00 €
Supervisión del tutor	42,00 €	90	3.780,00 €
TOTAL:			4.516,00 €

El coste de material y software es nulo porque solo se ha hecho uso del paquete Office, especialmente Excel, que es proporcionado de forma gratuita a los estudiantes de la UPV. Si bien se ha mencionado el programa GT Suite, fue usado por un doctorando del CMT a modo de ayuda, y no ha formado parte del trabajo.

Se ha supuesto un beneficio industrial del 10%, y los gastos generales en un 8%. Con todo esto, el resultado final es:

Tabla 12: Presupuesto.

Concepto	Importe (€)
Mano de obra	4.516,00 €
Material y software	- €
Gastos generales (10%)	451,60 €
Beneficio (8%)	361,28 €
SUBTOTAL	5.328,88 €
IVA (21%)	1.119,06 €
TOTAL	6.447,94 €

Con ello, y tras aplicar el IVA (Impuesto de Valor Añadido) del 21%, el total es de **SEIS MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y SIETE CON NOVENTA Y CUATRO EUROS**.

Nota: Debido a la naturaleza de este trabajo investigadora como estudio de comparación de alternativas, no se ha considerado necesario incluir un pliego de condiciones, ni un apartado de planos.