



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA
Trabajo Fin de Grado



**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA PROPULSIÓN DE
VEHÍCULOS COLECTIVOS PARA EL TRANSPORTE DE VIAJEROS
POR CARRETERA**

**Study of alternatives for the propulsion of collective vehicles for the
transport of travelers by road**

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de Recursos Energéticos

Autor: Celia Pérez Mencía

Director: Juan Carcedo Haya

Convocatoria: Septiembre 2019



RESUMEN

El sector transporte es el mayor contribuyente a la emisión de gases de efecto invernadero en España, y por lo tanto cada vez se propone un mayor número de medidas para actuar sobre él. Dentro de este sector, el transporte por carretera representa el 80% de la movilidad total, tanto de mercancías como de pasajeros.

El modelo de crecimiento urbanístico disperso está causando el aumento de las emisiones asociadas a este último tipo de movilidad. Una de las medidas clave que se proponen en España es promover un mayor uso del transporte colectivo de viajeros, como por ejemplo, autobuses (para movilidad urbana) y autocares (para largo recorrido).

Desde el ministerio para la transición ecológica se plantean diversas ayudas e incentivos para impulsar el vehículo con tecnologías alternativas. Entre ellas se contemplan el vehículo eléctrico, de pila de hidrógeno, de gas natural, de gases licuados de petróleo (GLP) y de biocombustibles.

En este estudio se realizará una comparativa entre las tecnologías de gas natural comprimido, eléctrico y de pila de hidrógeno, desde un enfoque general a nivel nacional, hasta un nivel más detallado teniendo en cuenta la viabilidad económica de empresas cuya actividad se base en el transporte colectivo de viajeros.

Se opta por los autobuses urbanos, debido a la mayor relevancia que tienen estos, tanto en el número de viajeros transportados, como en la importancia de reducir sus emisiones al encontrarse muy concentradas en las ciudades.



SUMMARY

The transport sector is the largest contributor to the emission of greenhouse gases in Spain, and therefore a greater number of measures are proposed to act on it. Within this sector, road transport represents 80% of total mobility, both of goods and passengers.

The dispersed urban growth model is causing the increase in emissions associated with the latter type of mobility. One of the key measures proposed in Spain is to promote greater use of collective passenger transport, such as buses (for urban mobility) and coaches (for long distances).

From the Ministry for the ecological transition, various aids and incentives are proposed to boost the vehicle with alternative technologies. These include the electric vehicle, hydrogen battery, natural gas, liquefied petroleum gas (LPG) and biofuels.

In this study, a comparison will be made between compressed, electric and hydrogen stack natural gas technologies, from a general approach at the national level, to a more detailed level taking into account the economic viability of companies whose activity is based on transport group of travelers.

Urban buses are chosen, due to the greater relevance of these, both in the number of passengers transported, and in the importance of reducing their emissions by being very concentrated in cities.



INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS.....	9
INDICE DE TABLAS.....	13
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. PALABRAS CLAVE.....	15
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	15
1.3. OBJETIVOS METODOLÓGICOS.....	15
1.4. ALCANCE	16
1.5. METODOLOGÍA	16
2. EL SECTOR TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO EN ESPAÑA.....	17
2.1. ORGANIZACIÓN DEL SECTOR	17
2.2. RELEVANCIA ECONÓMICA.....	19
2.2.1. Indicadores económicos	19
2.2.2. Demografía empresarial	22
2.3. RELEVANCIA SOCIAL.....	23
2.3.1. Sueldos y salarios.....	23
2.3.2. Empleo.....	24
2.4. RELEVANCIA MEDIOAMBIENTAL.....	26
2.4.1. Consumo energético.....	26
2.4.2. Eficiencia energética	27
2.4.3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	29
2.4.4. Eficiencia ambiental.....	30
2.5. TRANSPORTE COLECTIVO DE VIAJEROS POR CARRETERA	32
3. ALTERNATIVAS DE IMPULSIÓN DE VEHÍCULOS.....	35
3.1. GAS NATURAL VEHICULAR	35
3.1.1. Principales usos del Gas Natural.....	35
3.1.2. Características y composición.....	36
3.1.3. Funcionamiento.....	37

3.1.4.	Situación internacional y nacional.....	37
3.2.	PILA DE COMBUSTIBLE.....	40
3.2.1.	Propiedades.....	40
3.2.2.	Funcionamiento.....	41
3.2.3.	Obtención.....	42
3.2.4.	Otros usos.....	42
3.2.5.	Situación nacional e internacional.....	43
3.3.	ELECTRICIDAD.....	46
3.3.1.	Funcionamiento.....	46
3.3.2.	Situación nacional e internacional.....	47
4.	SITUACIÓN ACTUAL DEL PARQUE DE AUTOBUSES.....	51
4.1.	PARQUE DE AUTOBUSES EN ESPAÑA.....	51
4.2.	ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS.....	53
4.2.1.	Gas Natural Vehicular.....	55
4.2.2.	Pila de Combustible: Hidrógeno.....	59
4.2.3.	Impulsión eléctrica.....	62
4.3.	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	67
4.3.1.	Cálculo de costes.....	68
4.4.	RESULTADOS PROPIOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA A UN EJEMPLO PRÁCTICO 70	
4.4.1.	Gas Natural Vehicular.....	70
4.4.2.	Pila de Combustible: Hidrógeno.....	75
4.4.3.	Impulsión eléctrica.....	78
5.	CONCLUSIONES.....	83
6.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	85
7.	ANEXOS.....	86
7.1.	Datos numéricos de (40).....	86
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: VAB de Transporte y Almacenamiento, dividido por subsectores	20
Figura 2.2: Evolución del VAB del sector Transporte y Almacenamiento por subsectores / 2010 - 2017.....	21
Figura 2.3: Aportación (millones €) en sueldos y salarios del sector Transporte y Almacenamiento en el año 2016, por subsectores	23
Figura 2.4: Aportación (% respecto al total del sector) en sueldos y salarios del sector Transporte y Almacenamiento en el año 2016, por subsectores.....	24
Figura 2.5: Evolución en el número de personas con la ocupación de conductor en el sector Transporte y Almacenamiento / 2011 – 2018.....	25
Figura 2.6: Consumo de energía final en España por subsectores para el año 2017	26
Figura 2.7: Eficiencia energética y consumos por tipo de transporte en TJ/km en base a datos de 2016	28
Figura 2.8: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España por sectores, en el año 2017	30
Figura 2.9: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en toneladas equivalentes de CO2 para cada TJ de energía consumida por cada tipo de transporte, en el año 2016	31
Figura 2.10: Evolución del número de viajeros transportados dividido por tipo de transporte, para el transporte colectivo de viajeros por carretera / 2011 – 2018	32
Figura 3.1: Principales países exportadores de gas natural en forma gaseosa	38
Figura 3.2: Principales países importadores de gas natural en forma gaseosa	39
Figura 3.3: Países de origen de las importaciones de gas natural en forma gaseosa españolas.....	40
Figura 3.4: Principio de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno.....	41
Figura 3.5: Principales países exportadores de hidrógeno en el año 2017	44
Figura 3.6: Principales países importadores de hidrógeno en el año 2017	44
Figura 3.7: Países de destino de las exportaciones de hidrógeno españolas.....	45
Figura 3.8: Países de origen de las importaciones de hidrógeno españolas	46
Figura 3.9: Evolución anual de las importaciones de energía eléctrica (GWh).....	47
Figura 3.10: Evolución anual de las exportaciones de energía eléctrica (GWh).....	48

Figura 3.11: Estructura de la generación eléctrica peninsular de 2018	49
Figura 4.1: Evolución anual del parque de autobuses de gasolina	51
Figura 4.2: Evolución anual del parque de autobuses diésel	52
Figura 4.3: Evolución anual del parque de autobuses con métodos de impulsión alternativos.....	53
Figura 4.4: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús a GNC	55
Figura 4.5: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús a GNC.....	56
Figura 4.6: Comparativa del consumo de combustible entre un autobús diésel y un autobús a GNC.....	56
Figura 4.7: Comparación del precio de combustible entre diésel y GNC en Australia en el año 2016	57
Figura 4.8: Comparativa de LCC para una distancia recorrida de 30.000 km entre un autobús diésel y un autobús a GNC	57
Figura 4.9: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno	59
Figura 4.10: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno.....	60
Figura 4.11: Comparativa del consumo de combustible entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno.....	60
Figura 4.12: Comparativa de precios de combustible diésel e hidrógeno para automoción para Australia en 2016.	61
Figura 4.13: Comparativa de LCC entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno para una distancia recorrida de 30.000 km	62
Figura 4.14: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería.....	63
Figura 4.15: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería.....	63
Figura 4.16: Comparativa del consumo equivalente de combustible entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería.....	64
Figura 4.17: Comparativa del precio de combustible equivalente entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería.....	65
Figura 4.18: Comparativa del LCC entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de	



batería considerando una distancia recorrida de 30.000 km.....	66
Figura 4.19: Comparativa del LCC entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería considerando una distancia recorrida de 800.000 km	66
Figura 4.20: Perfil de consumo de combustible mensual del autobús nº 1 a lo largo del año 2018	72
Figura 4.21: Curvas de coste acumulado del LCC para ambas flotas, GNC y diésel, a lo largo de los 16 años de servicio.....	75
Figura 4.22: Comparación del coste acumulado del ciclo de vida de la flota de autobuses a lo largo de los 16 años de servicio, para las opciones diésel y HFCB....	77
Figura 4.23: Comparación del coste acumulado del ciclo de vida de toda la flota para 16 años, entre la versión diésel y la eléctrica	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.1: Evolución del consumo energético del sector transporte por tipo de transporte / 2011 - 2016.....	26
Tabla 4.1: Comparación del coste de adquisición total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC.....	71
Tabla 4.2: Comparación del coste de mantenimiento total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC.....	72
Tabla 4.3: Comparación del coste de combustible total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC.....	74
Tabla 4.4: Comparación del coste de adquisición total de la flota y de cada autobús para el caso del HFCB.....	76
Tabla 4.5: Comparación de los costes de mantenimiento entre el modelo diésel y el HFCB, para toda la flota y para cada autobús.....	76
Tabla 4.6: Comparativa del coste de combustible para toda la flota y para cada autobús, entre modelo diésel y su análogo HFCB.....	77
Tabla 4.7: Comparativa de los costes de adquisición de la flota y para cada autobús entre la versión diésel y la eléctrica.....	78
Tabla 4.8: Comparativa de los costes de mantenimiento para la flota y para cada autobús, entre las versiones diésel y eléctrica.....	79
Tabla 4.9: Comparativa de coste de combustible para toda la flota y para cada autobús, entre el modelo diésel y eléctrico.....	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PALABRAS CLAVE

Sector Transporte y Almacenamiento, transporte terrestre, transporte y logística, transporte de pasajeros, transporte de viajeros por carretera, transporte colectivo de viajeros, combustibles alternativos, Gas Natural Comprimido, Gas Natural Vehicular, Pila de Combustible de Hidrógeno, autobuses eléctricos, BEB (Battery-electric Bus), HFCB (Hydrogen Fuel Cell Bus), Lifecycle cost, coste del ciclo de vida, autobús, movilidad urbana.

1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este estudio es analizar el transporte colectivo de viajeros por carretera, desde un punto de vista energético y económico, mediante la comparación de tres métodos alternativos de impulsión de autobuses, de gas natural comprimido, eléctrico y de pila de combustible de hidrógeno. Mediante este análisis, se busca determinar qué opción es más viable para la empresa privada dedicada a este tipo de movilidad.

1.3. OBJETIVOS METODOLÓGICOS

Como objetivos específicos a llevar a cabo para cumplir con el objetivo principal encontramos:

Analizar el sector Transporte y Almacenamiento, mediante la realización de una descripción de sus subsectores y la cuantificación de la relevancia económica, social y ambiental que tiene a nivel nacional.

Describir las alternativas que se van a comparar, mediante un análisis de sus propiedades y características, así como las opciones existentes en el mercado y su situación nacional e internacional.

Sintetizar la información y realizar la comparativa de los autobuses, mediante la búsqueda y combinación de información comparativa de este tipo de vehículos.

Por último, realizar un ejemplo práctico basado en datos reales de una empresa local, para determinar la opción más viable y cuantificar la inversión que supondría un cambio de flota.

1.4. ALCANCE

Para poder llevar a cabo este objetivo con rigurosidad, será necesario establecer claramente las condiciones de contorno en el instante de redacción de este estudio.

Entre estas condiciones encontramos una visión general del sector transporte en su conjunto, para poder discernir su importancia y la relevancia que pudiese conllevar la adopción de combustibles no convencionales.

Entrando más en detalle en el transporte de pasajeros, ¿Cuántas personas se verían implicadas? ¿Qué inversiones implicaría para los empresarios? ¿Qué tecnología se prevé que prevalezca sobre las demás?

Todo lo mencionado en este estudio se basa en datos del año 2017 y anteriores, con lo cual el alcance es limitado. La falta de datos actualizados fuerza a la estimación de datos actuales, por ello se tratará en la medida de lo posible analizar la evolución de los indicadores estudiados. Toda la información aquí recogida es de dominio público, y no ha implicado directamente a ninguna empresa. Para la realización del ejemplo práctico se han utilizado datos cedidos por una empresa local de autobuses

1.5. METODOLOGÍA

Al ser un trabajo fin de grado que consiste en un análisis, la metodología seguida seguirá una serie de pasos bien definidos. En primer lugar, se define un problema o duda. En este caso, el problema es que no se tiene certeza aún de qué método de impulsión es el más viable para la empresa privada dedicada a la movilidad mediante autobús.

La hipótesis mayormente reconocida apuesta por el gas natural vehicular, pero es necesario hacer un análisis concienzudo, basado en datos reales, para poder afirmar tal cosa.

Para tratar de responder a esta pregunta, se extraerá información de organismos públicos, así como de documentos realizados por diversos autores, con el fin de aunar toda la información y obtener una conclusión que tenga en cuenta la viabilidad económica real de dichas soluciones.

Tras realizar esta búsqueda de información, se detallarán las conclusiones obtenidas, y se contrastarán mediante un ejemplo práctico, en el cual se detallará la inversión que conllevaría una sustitución de una flota real de autobuses diésel a alguno de estos métodos alternativos.

La metodología aplicada a dicho ejemplo práctico se detalla en el apartado 4.3, ya que se basa en métodos y porcentajes elaborados en base a los utilizados por los autores anteriormente citados en el apartado 4.2.

2. EL SECTOR TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO EN ESPAÑA

Enmarcado dentro del sector terciario económico, el sector transporte y almacenamiento abarca un amplio campo de actuación. Es considerado uno de los sectores decisivos en el desarrollo económico de un país, debido a que es la base del traslado y movimiento de mercancías y pasajeros. La mayoría de los sectores dependen en gran medida de la eficiencia y calidad de los desplazamientos, y estos, al ser grandes consumidores de energía, afectan directamente a la economía del país.

En España, el ministerio de fomento es el encargado de gestionar este sector, y pone a disposición pública datos obtenidos de diversos estudios, de los cuales se puede deducir la importancia económica del sector en el ámbito nacional e internacional.

2.1. ORGANIZACIÓN DEL SECTOR

Este sector, “Transporte y almacenamiento”, ocupa el apartado H de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas [1], según la cual dentro de este sector se diferencian 5 subsectores, con su consiguiente número clasificatorio:

- 49. Transporte terrestre y por tubería
- 50. Transporte marítimo y por vías navegables interiores
- 51. Transporte aéreo
- 52. Almacenamiento y actividades anexas al transporte
- 53. Actividades postales y de correos

A continuación se realiza una descripción general de cada uno de ellos.

A. Transporte terrestre y por tubería

Es el subsector que ocupa este estudio, ya que en él se engloba todo tipo de transporte que puede ser realizado mediante autobús, el vehículo objeto de este análisis.

Dentro de este subsector se agrupan diferentes métodos de transporte.



Contempla el transporte por ferrocarril, diferenciando entre el transporte interurbano de pasajeros y el transporte de mercancías. También el transporte por tubería, el transporte de mercancía por carretera y servicios de mudanza.

El transporte de pasajeros por carretera se engloba en un apartado, denominado “Otro transporte terrestre de pasajeros”

Dentro de este apartado se contemplan tres tipos de transporte:

- a. Transporte terrestre urbano y suburbano de pasajeros
- b. Transporte por taxi
- c. Transporte terrestre de pasajeros no comprendido en otras partes.

Aquí la clasificación diferencia entre dos tipos de transporte en lo que se refiere a autobuses. Se encuentra el transporte terrestre urbano y suburbano de pasajeros, en el que queda referido el transporte de pasajeros por itinerarios regulares y con horario preestablecido, en el que las conexiones se realizan en paradas fijas, tomando y dejando pasajeros.

Por otro lado se encuentra el apartado de otros tipos de transporte terrestre de pasajeros no comprendido en otras partes, en el que se encuentran incluidos los servicios regulares de autobuses de largo recorrido, servicios discrecionales en autocares y desplazamientos en autobuses escolares y para empleados.

B. Transporte marítimo y por vías navegables interiores

Aquí se encuentran englobados todas aquellas actividades que requieran del transporte marítimo. Se diferencian en dos grupos, transporte marítimo general, y transporte marítimo por vías navegables interiores, dentro de los cuales la clasificación diferencia entre el transporte de pasajeros y el transporte de mercancías.

C. Transporte aéreo

Dentro de este subsector se contempla el transporte de pasajeros, el transporte de mercancías, y el transporte espacial.

D. Almacenamiento y actividades anexas al transporte

Aquí la clasificación diferencia, como el nombre del subsector indica, entre el almacenamiento de mercancías, y otro tipo de actividades anexas al transporte.



Dentro de esas actividades, se diferencian por el tipo de transporte al que dan soporte, si bien es terrestre, marítimo o aéreo. Debido a su importancia, también se contempla en un apartado específico la manipulación de mercancías.

E. Actividades postales y de correos

Este apartado no suele contemplarse con mucho detalle en los estudios acerca del transporte y almacenamiento, ya que su contenido difiere un poco del resto de subsectores. En él se encuentra información acerca de actividades relacionadas con los servicios postales y de correos, que pueden estar o no sometidos a la obligación de servicio universal.

Ya se ha mencionado la importancia del sector transporte en la economía, y para traducirlo a números es necesario conocer la influencia de este sector en los principales indicadores nacionales.

2.2. RELEVANCIA ECONÓMICA

2.2.1. Indicadores económicos

Como principales indicadores de la importancia económica de este sector se van a tomar el % que aporta al PIB (Producto Interior Bruto) nacional y el VAB (Valor Añadido Bruto) producido por dicho sector.

Se define el PIB como el indicador que refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un país en un periodo determinado, y el VAB como la diferencia entre el valor de la producción valorada a precios básicos y los consumos intermedios valorados a precio de adquisición para una actividad determinada [2].

El PIB se puede definir como la suma de los VAB a precios básicos, añadiendo los impuestos netos (sin subvenciones) sobre productos e importaciones.

El sector transporte aportó en el año 2017 el 3.3% del PIB nacional, cuyo origen tiene lugar en un VAB de 47.900 millones de euros.

Para analizar más a fondo qué porcentaje de ese VAB se corresponde a cada subsector, es necesario referirse a los datos del año 2016, último año del que se tienen datos concretos por subsectores. Se puede establecer una semejanza entre estos porcentajes y los que se corresponden con los actuales.



Participación por subsector en el VAB de Transporte y Almacenamiento de 2016

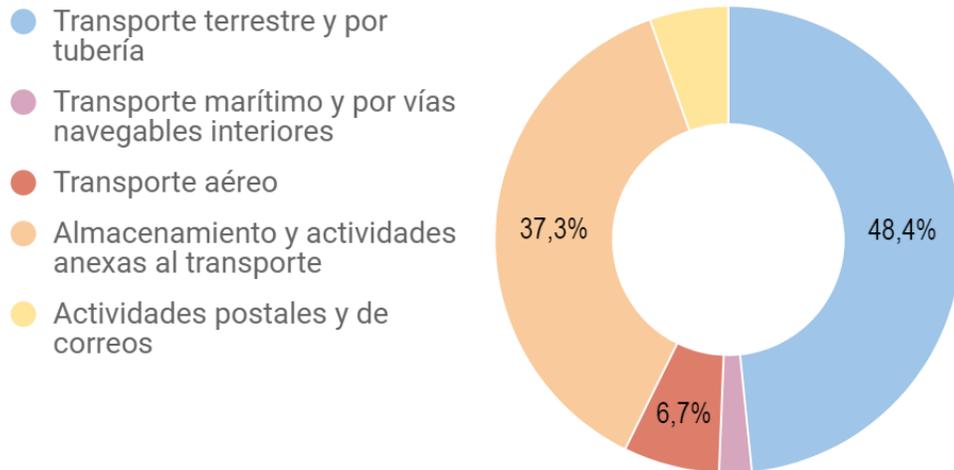


Figura 2.1: VAB de Transporte y Almacenamiento, dividido por subsectores

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de la Contabilidad Nacional anual de España del Instituto Nacional de Estadística.

Mediante la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, se puede obtener por porcentajes la participación de cada uno de los subsectores mencionados en el apartado 1.1 sobre el VAB del sector transportes [3].

Como se puede observar en el gráfico, existe una clara diferencia entre los dos principales subsectores, y el resto de ellos.

El transporte terrestre y por tubería, y el almacenamiento y actividades anexas al transporte son los generadores del 85.7% del VAB del sector transporte y almacenamiento en el año 2016.

Dentro del almacenamiento y actividades anexas al transporte, existe una parte referida únicamente al transporte terrestre, con lo cual se puede deducir que, aunque no existan datos concretos, la participación general es incluso superior al 48.4%.

Estos resultados, como ya se ha mencionado, se basan en datos de 2016. Es de presuponer que a lo largo de estos tres años no hayan variado especialmente, pero para mayor rigurosidad, se puede observar la evolución seguida desde unos años atrás.



Variación del VAB desde 2010 hasta 2017 por subsectores

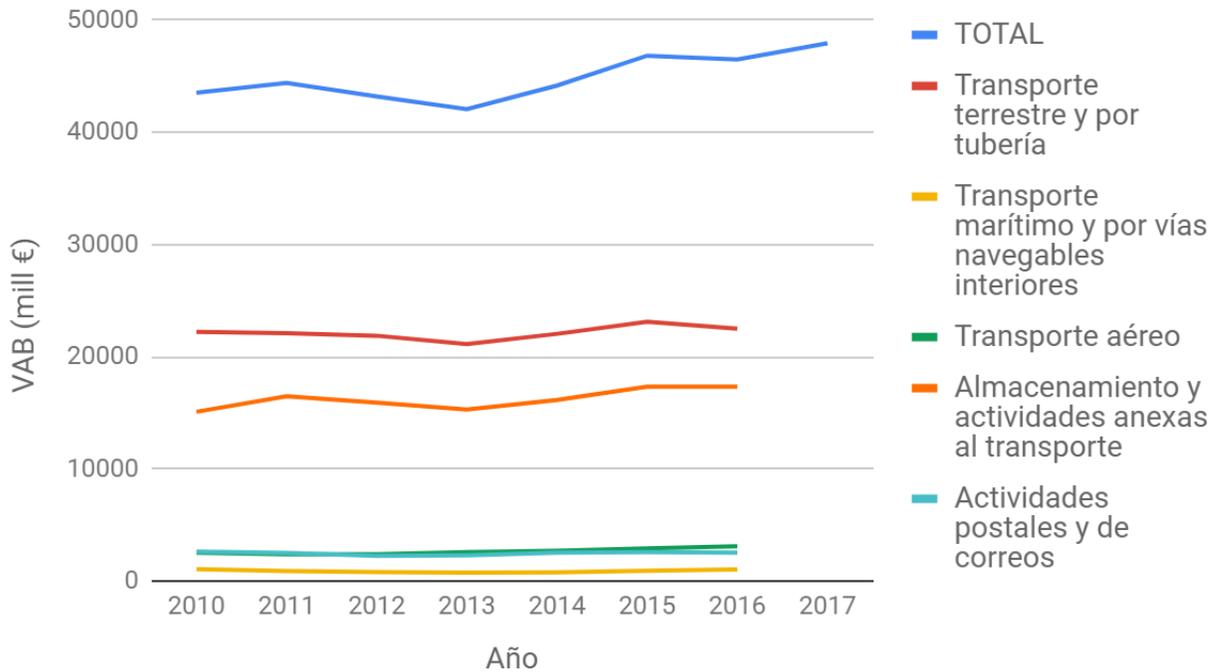


Figura 2.2: Evolución del VAB del sector Transporte y Almacenamiento por subsectores / 2010 - 2017

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de la Contabilidad Nacional anual de España del Instituto Nacional de Estadística

Como se puede observar en este gráfico, desde 2010 estos dos subsectores se mantienen como los mayores generadores de valor, dejando a un lado pequeñas variaciones.

El subsector del transporte terrestre se mantiene por encima del almacenamiento, mientras que los otros tres, pese a que también tienen una participación nada despreciable de aproximadamente 6.800 millones de euros, se quedan muy por debajo de estos dos.

El sector transporte, al igual que la gran mayoría de sectores en España, se vio fuertemente afectado por la crisis económica de 2008. Sin embargo, la caída en picado de los precios del petróleo en dicho año logró amortiguar en cierta medida la disminución de la producción de este sector.



Como se puede observar en el gráfico, entre 2011 y 2013 ha tenido lugar un descenso notable, debido principalmente al alza de los precios del petróleo, alcanzando los máximos del barril de Brent al inicio de cada uno de esos tres años. En el año 2014 estos precios vuelven a caer, causando la reacción opuesta en este sector [4].

La conclusión que se obtiene es que es un sector altamente dependiente del petróleo, ya que prácticamente todos sus métodos de impulsión utilizan como combustible algún derivado de éste. El hecho de presentar alternativas desligadas de esta materia prima, descendería de forma directa esta dependencia.

2.2.2. Demografía empresarial

El sector transporte y almacenamiento tiene tanta importancia debido a que es clave en muchos otros sectores, ya que dependen en gran medida de la rapidez y fiabilidad de la logística empresarial. Puede ser tanto de mercancías como de pasajeros.

A continuación se encuentra una lista de los sectores más dependientes del transporte [5], en orden descendente en función del peso que genera la logística en el precio de venta final:

1. Editorial: 9.3%
2. Consumo y Retail: 8.1%
3. Textil: 6.9%
4. High-Tech: 6.5%
5. Construcción: 5.8%

En el sector transporte y logística, aproximadamente 20400 empresas se dedican al transporte de mercancías, de las cuales el 79% basa su actividad en el transporte terrestre por carretera. Es remarcable destacar que incluso teniendo un mercado más pequeño que otros países, en comparación el número de empresas es bastante superior.

Como características generales podemos destacar que la mayoría son empresas pequeñas con poco volumen de facturación y elevada cantidad de personas físicas.



2.3. RELEVANCIA SOCIAL

La relevancia social de este sector radica en la cantidad de personas y empresas implicadas, cuya actividad esté relacionada con alguno de los cinco apartados dentro del sector. Para determinar esta relevancia, se propone un análisis del total de sueldos y salarios dedicados a este sector, y la cantidad de personas empleadas.

2.3.1. Sueldos y salarios

A nivel nacional, en el año 2016 la suma de salarios dedicados a este sector ascendió a 19.400 millones de euros [6].

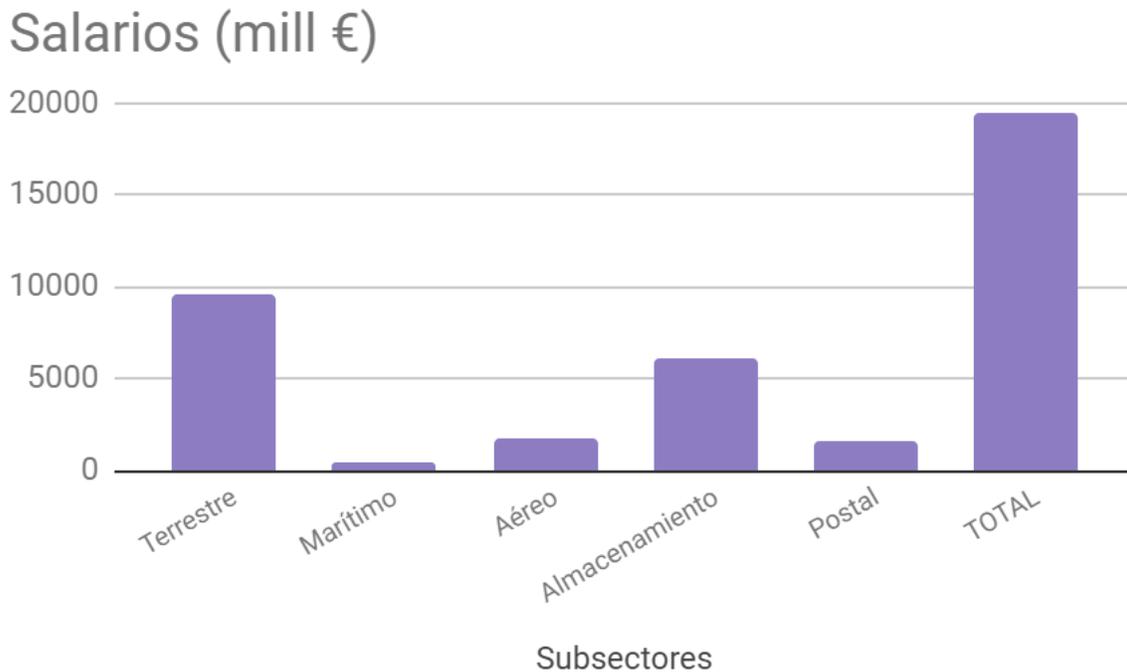


Figura 2.3: Aportación (millones €) en sueldos y salarios del sector Transporte y Almacenamiento en el año 2016, por subsectores

Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística



% Respecto al total

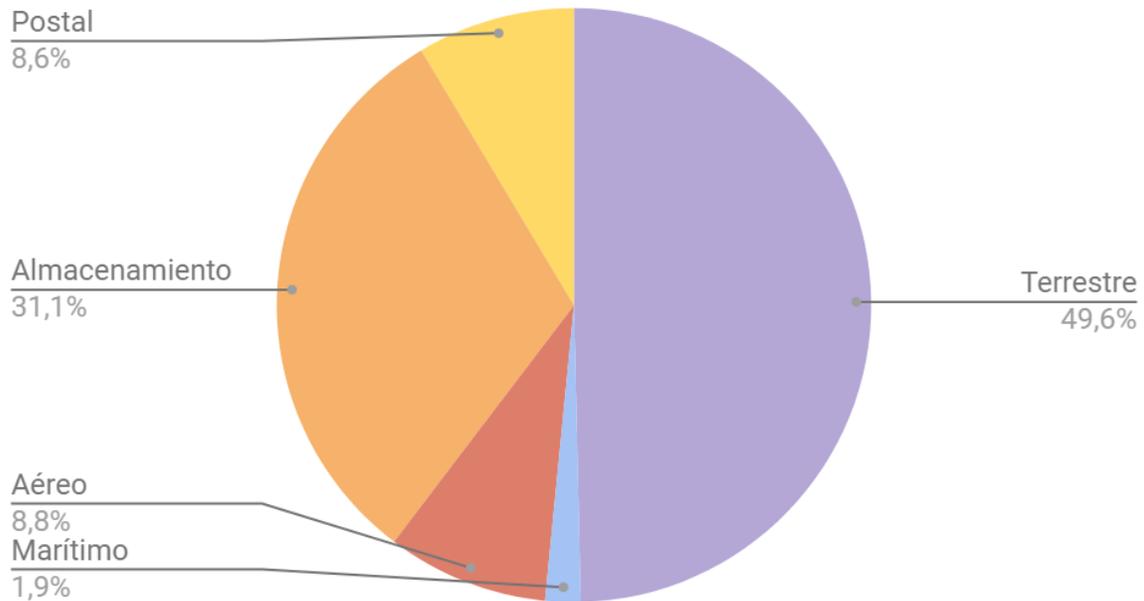


Figura 2.4: Aportación (% respecto al total del sector) en sueldos y salarios del sector Transporte y Almacenamiento en el año 2016, por subsectores

Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística

Como se puede observar en la figura, la principal participación la tiene el subsector del transporte terrestre y por tubería, seguido del almacenamiento y actividades anexas, sumando el 80,7% con su acción conjunta.

2.3.2. Empleo

Existen pocos asalariados en este sector, ya que la mayoría de empleados son autónomos por cuenta propia. Sin embargo, existe un gran número de conductores de vehículos para el transporte urbano y por carretera, detallados a continuación [6].



Número de conductores pertenecientes al sector transporte y almacenamiento

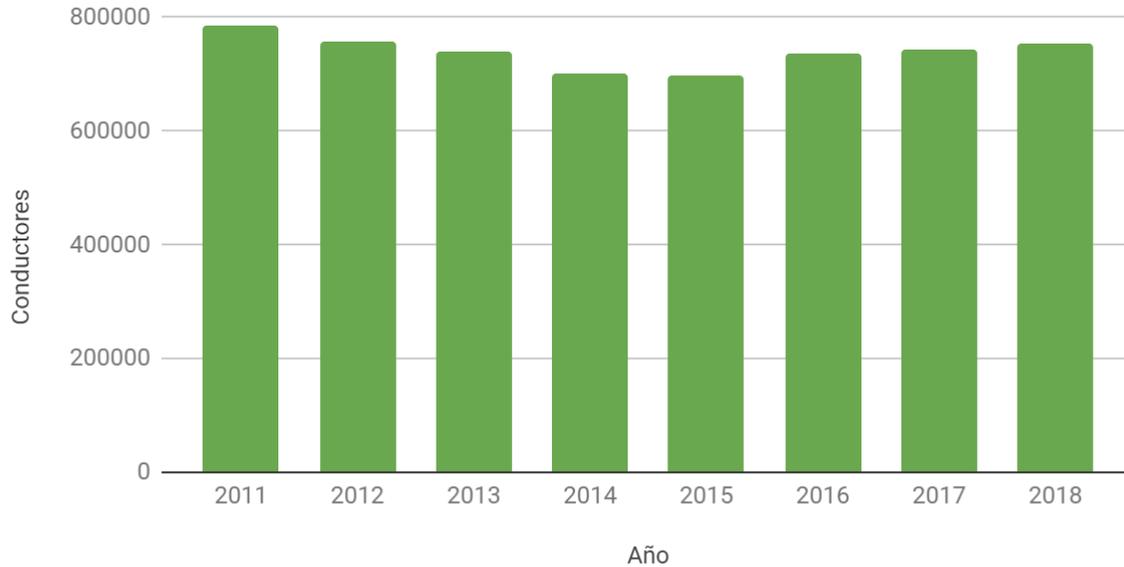


Figura 2.5: Evolución en el número de personas con la ocupación de conductor en el sector Transporte y Almacenamiento / 2011 – 2018

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Encuesta de Población Activa realizada por el Instituto Nacional de Estadística

Este dato sirve para tener una aproximación de la cantidad de personas cuya ocupación tiene que ver con este sector. A este valor hay que añadirle aproximadamente 200.000 ocupados más en otros puestos relacionados, alcanzando aproximadamente el millón de personas.

Esto supone aproximadamente entre el 4,2 y el 4,5% de los ocupados españoles, lo cual implica un gran porcentaje de personas dependiente de este sector [7].

2.4. RELEVANCIA MEDIOAMBIENTAL

2.4.1. Consumo energético

La Unión Europea es altamente dependiente energéticamente, ya que importó en 2017 aproximadamente el 56% de la demanda total de energía. España sigue en esa línea, dentro de Europa, ocupa el octavo puesto en el ranking de mayor dependencia energética, con un 76% [8]. El mayor consumidor de esa energía es el sector transporte, seguido del industrial y residencial [9].

Consumo de energía final por sectores (%)

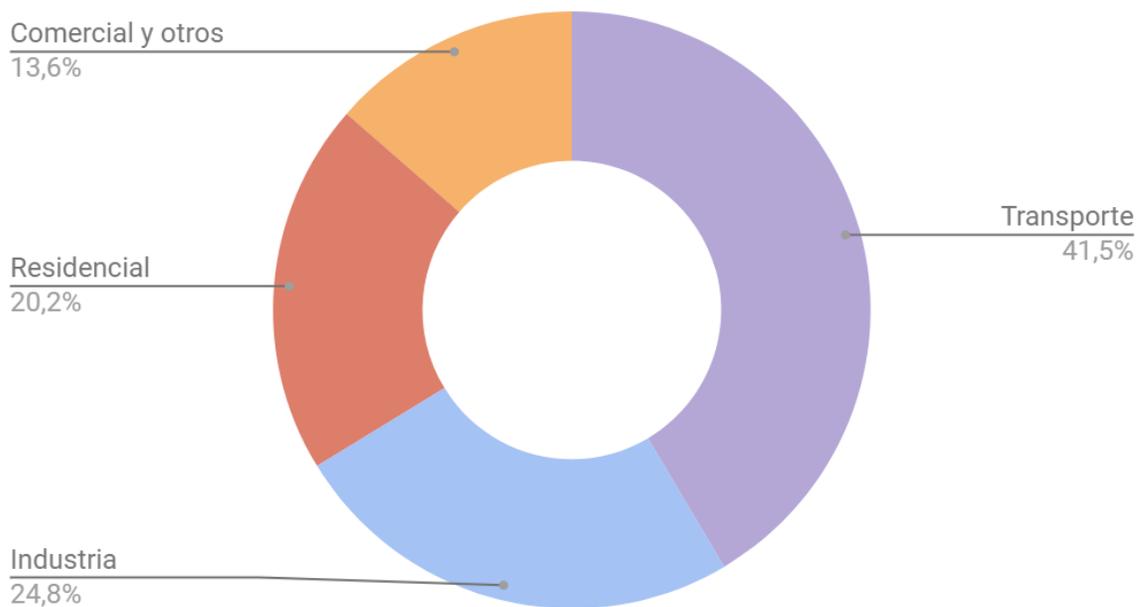


Figura 2.6: Consumo de energía final en España por subsectores para el año 2017

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Eurostat

El transporte constituye alrededor del 42% del consumo energético nacional.

Tabla 2.2.1: Evolución del consumo energético del sector transporte por tipo de transporte / 2011 - 2016

Modo de transporte	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Ferroviario	17.383	16.737	16.175	16.513	16.344	15.933
Aéreo	46.409	38.571	32.892	32.655	34.038	36.737
Marítimo*	34.102	35.677	21.181	13.487	17.893	25.281
Carretera total	1.154.610	1.096.570	1.062.175	1.077.363	1.114.598	1.149.591
Carretera urbana**	396.885	380.203	364.303	373.633	379.812	393.097
Carretera no urbana	757.725	716.366	697.872	703.729	734.786	756.495
Carretera no urbana - pasajeros	438.769	419.188	412.460	409.745	424.908	441.636
Carretera no urbana - mercancías	318.956	297.178	285.411	293.985	309.878	314.858
Total transporte nacional	1.252.504	1.187.554	1.132.423	1.140.019	1.182.873	1.227.543

Fuente: Informe Anual del Observatorio del Transporte y la Logística en España 2018, Ministerio de Fomento.

2.4.2. Eficiencia energética

La eficiencia energética en el transporte se define como la cantidad de energía final consumida por “unidad de transporte” recorrida [10]. La unidad de transporte dependerá de cada tipo de transporte, sin embargo se toma como unidad básica de comparación el kilómetro recorrido.

Desde este punto de vista, el consumo indicado en el apartado anterior se divide entre consumo directo e indirecto.

Se considera consumo directo aquel utilizado en la propulsión del vehículo en cuestión. Si la propulsión es mediante combustible, será la cantidad de energía consumida en función del volumen de combustible utilizado.

Esto tiene en cuenta tanto la resistencia al avance del vehículo como la energía cinética y potencial no aprovechada. En resumen, todo tipo de pérdida que pueda darse, ya que sólo tiene en cuenta la cantidad de combustible utilizado.

El consumo indirecto de energía engloba otras actividades relacionadas con el transporte, entre ellas la construcción y el mantenimiento, tanto de las infraestructuras utilizadas como de los propios vehículos. Es mucho más difícil de medir que el anterior, con lo cual la mayoría de autores se basan en estimaciones.

Es importante destacar que en la mayoría de los casos, cuanto mayor sea la aportación indirecta al consumo final de energía, mayor es también la eficiencia energética, debido a que esto indica un mayor aprovechamiento del combustible. Aunque la relación no es directamente proporcional, es un buen indicador.



Se considera que en el transporte por carretera aproximadamente el 35-40% del consumo final tiene su origen en consumos indirectos, cifra que disminuye a medida que aumenta el peso del vehículo, llegando al 18% en camiones pesados articulados. A diferencia de estos datos, en el transporte por ferrocarril esta cifra aumenta hasta el 45%, considerándose el transporte más eficiente energéticamente.

El transporte aéreo tiene las peores cifras, variando entre el 18% en vuelos internacionales y el 36% en vuelos nacionales.

Realizando una media genérica, podemos obtener la siguiente figura, para el año 2016:

Eficiencia energética (TJ/km)

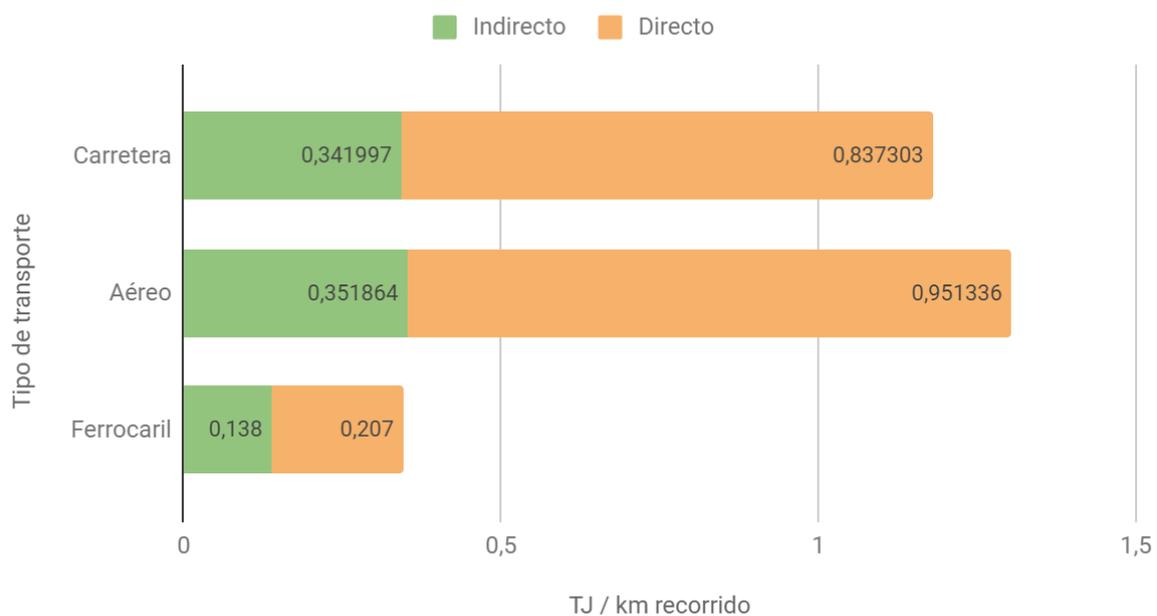


Figura 2.7: Eficiencia energética y consumos por tipo de transporte en TJ/km en base a datos de 2016

Fuente: Elaboración propia en base al Informe Anual del OTLE 2018, y el documento de La eficiencia energética y ambiental en los modos de transporte en España, de la Universidad Politécnica de Madrid.

En la figura se representan valores comparativos de eficiencia energética, obteniendo como conclusión que el ferrocarril es, de lejos, es transporte más eficiente, ya que su consumo energético por km es muy inferior al de otros tipos de transporte.



2.4.3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Se consideran gases de efecto invernadero (a partir de ahora GEI) todos aquellos que contribuyen al aumento del efecto invernadero de la atmósfera [11]. Entre ellos se encuentran:

- a. Dióxido de carbono (CO₂): es uno de los gases más comunes y con mayor concentración atmosférica. Su efecto se toma como unidad de referencia para comparar la capacidad de afección al calentamiento global de otros GEI.
- b. Metano (CH₄): su efecto equivale a 25 veces el del dióxido de carbono.
- c. Óxido nitroso (N₂O): su efecto equivale a 298 veces el del dióxido de carbono.
- d. Hidrofluorocarbonos (HFC): su efecto equivale a entre 124 y 14.800 veces el del dióxido de carbono.
- e. Perfluorocarbonos (PFC): su efecto equivale a entre 7.390 y 12.200 veces el del dióxido de carbono.
- f. Hexafluoruro de azufre (SF₆): su efecto equivale a 22.800 veces el del dióxido de carbono.

En el sector transporte actualmente existe el uso de combustibles alternativos. Es importante ser consciente de esto debido a que sus emisiones de GEI no computan como tal en su totalidad en las emisiones totales del sector transporte.

Todo aquel combustible fuera de los denominados “combustibles convencionales” (véase gasoil, gasolina, queroseno...) se considera de emisión nula, ya en el ciclo de vida de su producción se utiliza la misma cantidad de GEI que la que se emite al quemarle.¹

Este es el caso de los biocombustibles, pero en el caso de la electricidad no funciona exactamente así. Las emisiones asociadas a su obtención se consideran parte del sector eléctrico, por lo que tampoco se tienen en cuenta en el sector transporte.

Es por ello que el sector transporte evoluciona de manera positiva en lo que respecta al cómputo general de emisiones de GEI en España. Se posiciona como el principal emisor de este tipo de gases, con una participación del 26% [12].

¹ Se consideran combustibles alternativos el gas natural, los gases licuados de petróleo, la pila de combustible, la impulsión eléctrica y los biocombustibles.

Emisiones GEI en España por sectores en 2017 (% CO2 eq)

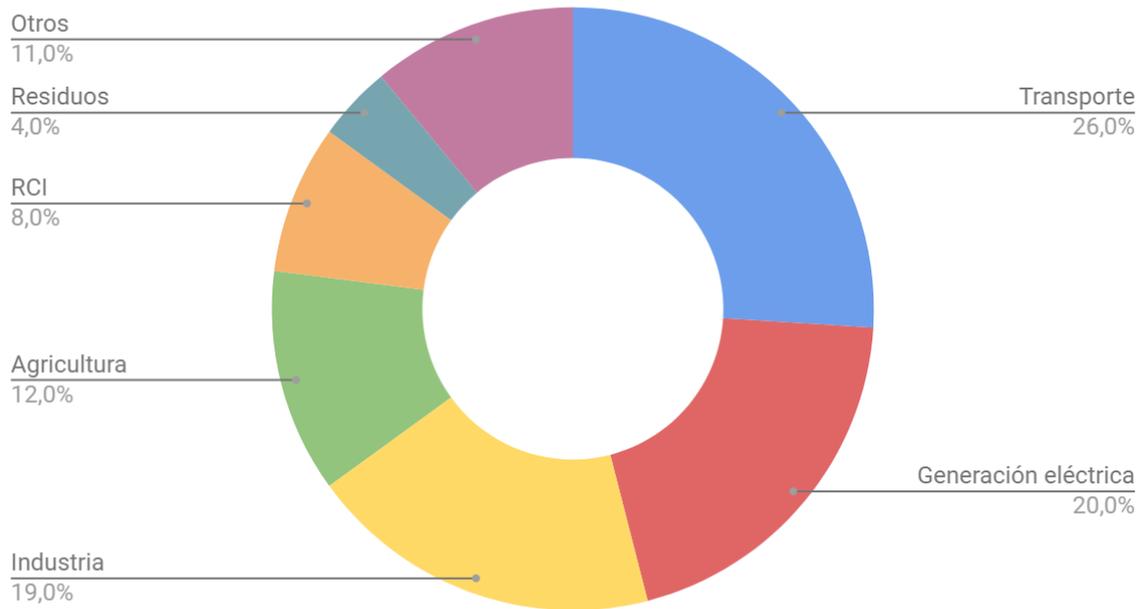


Figura 2.8: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en España por sectores, en el año 2017

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera de 2019, del Ministerio para la Transición Ecológica

2.4.4. Eficiencia ambiental

Se considera eficiencia ambiental a la cantidad de emisiones generadas por cada Tera Julio de energía consumido, y se mide en toneladas equivalentes de dióxido de carbono por TJ.



Emisiones de GEI en 2016 (ton eq CO₂ / TJ)

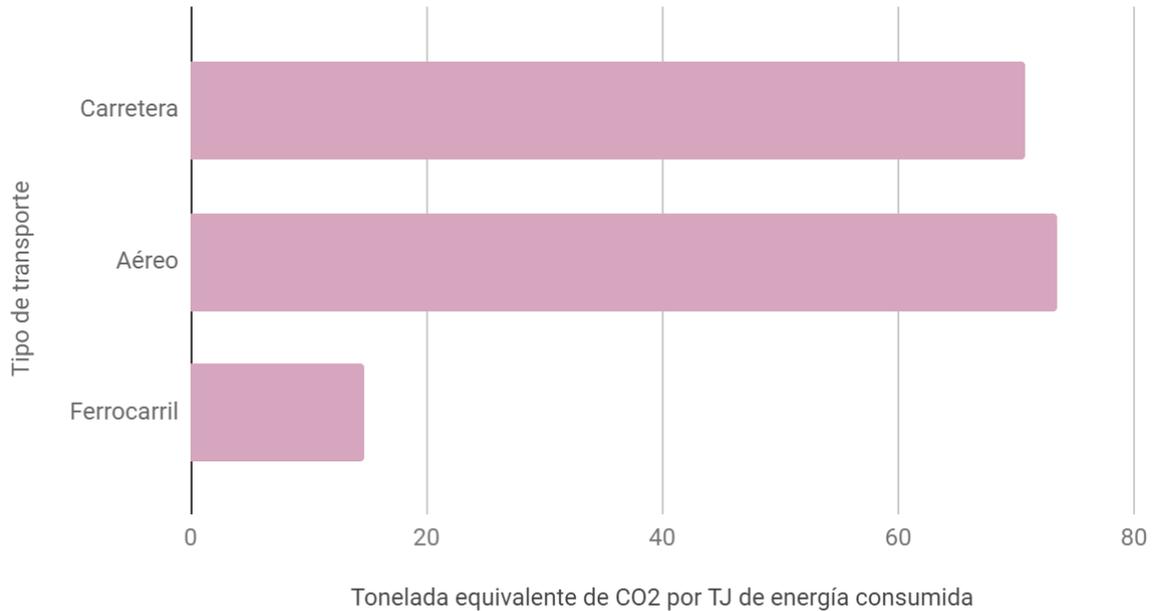


Figura 2.9: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en toneladas equivalentes de CO₂ para cada TJ de energía consumida por cada tipo de transporte, en el año 2016

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Informe Anual del OTLE de 2018

En el transporte por carretera existe una mayor inclusión de combustibles alternativos que en otros tipos de transporte (p.ej. biodiesel) desde hace aproximadamente trece años, con lo cual sus emisiones se ven reducidas, y su eficiencia ambiental mejora.

Para los datos de la figura, en el año 2016, la inclusión del vehículo eléctrico era despreciable, pero actualmente existe un auge de este tipo de vehículos que, aunque pequeño, reduce aún más el cómputo global de emisiones de este sector, aumentando la eficiencia ambiental [7].

2.5. TRANSPORTE COLECTIVO DE VIAJEROS POR CARRETERA

Como ya se ha mencionado en el apartado 1.1. Organización del sector, dentro del subsector de transporte terrestre y por tubería se encuentran los apartados referidos al transporte de pasajeros mediante autobús.

Pese a que el sector transporte y almacenamiento tiene gran importancia a nivel nacional, la mayoría del valor económico generado se refiere al transporte de mercancías. El transporte de pasajeros, también tiene su participación, pero en menor medida.

Debido a que el transporte colectivo de viajeros aúna empresas privadas y organismos públicos, no implica necesariamente una intención lucrativa, y por lo tanto la rentabilidad de esta actividad no depende únicamente de indicadores económicos.

Por ello, se considera como un buen indicador de su importancia la cantidad de personas transportadas. Para analizar este valor, se detalla su evolución en la figura a continuación.
[13]

Viajeros transportados por tipo de transporte / 2010-2018

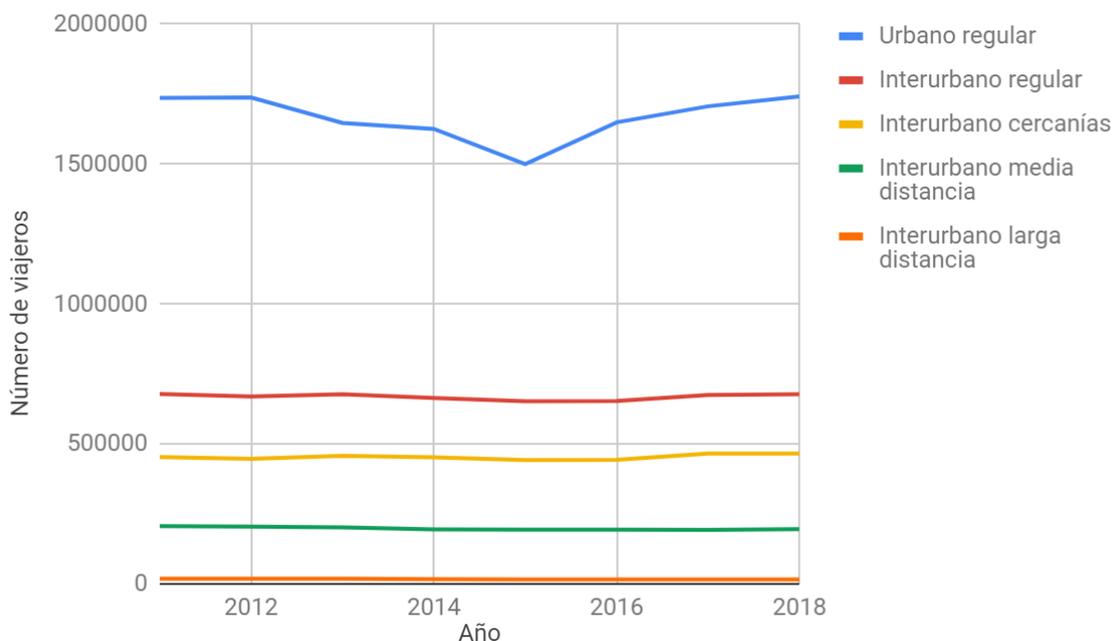


Figura 2.10: Evolución del número de viajeros transportados dividido por tipo de transporte, para el transporte colectivo de viajeros por carretera / 2011 – 2018

Fuente: Elaboración propia en base a datos estadísticos de transporte de viajeros del INE.



Se diferencian principalmente dos tipos de transporte, urbano e interurbano. Y para mayor concreción, dentro del transporte interurbano se divide en cercanías, de media distancia y de larga distancia. No se tienen en cuenta los viajes discrecionales, debido a la dificultad de obtener datos concretos.

Como se puede observar, el transporte urbano prácticamente dobla la cantidad de viajeros transportados a lo largo de los años, respecto al transporte interurbano. Es por ello que la mayoría de propuestas acerca de combustibles alternativos se aplican a los autobuses urbanos. Además, su efecto en la salud es mucho más pronunciado, al localizarse las rutas muy concentradas en las ciudades.



3. ALTERNATIVAS DE IMPULSIÓN DE VEHÍCULOS

3.1. GAS NATURAL VEHICULAR

Existen dos variantes de este combustible, el Gas Natural Comprimido (GNC) y el Gas Natural Licuado (GNL), en función de la fase térmica en la que se encuentren.

El GNL se almacena mediante su criogenización (-160°C), mientras que el GNC se almacena a alta presión entre 200 y 250 bares [14]. La mayor diferencia al utilizar un combustible u otro es en la autonomía que se puede conseguir. El GNL es el indicado para vehículos de transporte pesado que requieran mucha autonomía, por lo que usualmente se utiliza en camiones de largo recorrido. El GNC por el contrario, es ideal para trayectos cortos o en ciudad, por lo que es el más utilizado en turismos y autobuses.

3.1.1. Principales usos del Gas Natural

El gas natural se considera a nivel global como la tercera fuente energética, siguiendo al petróleo y al carbón. Analizando los otros usos que tiene el gas natural, además de como combustible para la automoción, se llega a la conclusión de que es un elemento muy versátil con gran variedad de usos.

En España estos usos se dividen en tres principales agrupaciones, los usos de carácter industrial, los usos de carácter doméstico, y el uso en la generación eléctrica [15].

A nivel industrial, se utiliza en mayor medida en los sectores industriales de fabricación de papel, cemento, metalurgia, productos químicos, refino de petróleo y materiales de construcción. Tiene dos usos prioritarios, la generación de calor (por ejemplo para hornos o procesos que requieran vapor) y la generación eléctrica. Existen industrias que combinan ambas necesidades, instalando plantas de cogeneración, consiguiendo una alta eficiencia energética e incluso excedentes de energía, que conllevan un aporte económico extra.

A nivel de generación eléctrica, existen en España 67 instalaciones de ciclo combinado. Este tipo de centrales combinan dos ciclos: un ciclo Brayton con una caldera de gas natural, en el que se genera calor y electricidad de manera conjunta, y un ciclo Rankine, en el que se aprovecha dicho calor para generar vapor que se utiliza en una turbina de vapor para generación eléctrica. El estado actual de estas centrales es genera bastante controversia, debido a que su generación es bastante inferior a la planificada en un primer momento por las empresas interesadas [16] [17].

A nivel doméstico [18] se utiliza en mayor medida para la calefacción mediante caldera de gas, y para la obtención de ACS (Agua Caliente Sanitaria). En la calefacción de los hogares va sustituyendo progresivamente el uso del butano y del propano, presentándose así mismo como una alternativa más económica que la calefacción eléctrica. Es un gas fácilmente detectable, ya que es menos denso que el aire y por lo tanto tiende a elevarse a la altura de la cabeza, aumentando así la seguridad de los hogares.

3.1.2. Características y composición

El gas natural es un hidrocarburo que se compone esencialmente de metano, CH₄, que tiene una relación de H/C (número de átomos de hidrogeno por cada átomo de carbono) más alta que el diésel o la gasolina, lo cual hace que sus emisiones de CO₂ sean menores. Genera menores emisiones de GEI que los vehículos diésel, aproximadamente un 10% menos de dióxido de carbono, 33% menos de óxidos nitrosos, y un 90% menos de partículas sólidas.

El porcentaje de metano de dicho gas ronda entre el 60 y el 98%, en función del yacimiento del que se haya extraído. También contiene pequeñas proporciones de etano y propano, y en menor medida puede contener trazas de butano, pentano, dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico, no excediéndose del 5%.

Se define como poder calorífico a la cantidad de calor que puede desprender un determinado volumen del gas correspondiente en condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 15 °C de temperatura. Debido a las variaciones que puede tener este dato, es necesario definir los límites inferior y superior (PCI, poder calorífico inferior, y PCS, poder calorífico superior, respectivamente) de dicho poder calorífico [19].

En el caso del gas natural, al ser un gas combustible se toma 0,9 como valor de la relación PCI/PCS. EL PCI del gas natural es de 8.358,19 kcal / m³, lo que equivale a 9,72 kWh / m³, mientras que el PCS del gas natural asciende a 9.296,74 kcal / m³, equivalente a 10,81 kWh / m³ [20].

La densidad relativa de un gas es su densidad respecto a la densidad del aire (gas de referencia), cuando se encuentra a 1 atmósfera de presión y 0 °C. Esta densidad para el gas natural, respecto al aire, es de 0,61 kg / m³.

La densidad real del gas natural en forma gaseosa, a 0°C y 1 atmósfera de presión es de 0,743 kg / m³. Sin embargo, para el caso del gas natural vehicular, en concreto del gas natural comprimido, la densidad a 15 °C y 200 bares de presión es de 158,49 kg / m³ [21] [22]

La normativa española (UNE 60002) propone una clasificación basada en el Índice de Wobbe, que consiste en tomar el poder calorífico del gas y dividirlo entre la raíz cuadrada de la densidad relativa de dicho gas respecto al aire. En la clasificación propuesta por esta norma UNE el cálculo del índice de Wobbe se lleva a cabo utilizando el poder calorífico superior, dando lugar a 3 familias de gases combustibles, en las cuales el gas natural se encuentra en la segunda.



[19]

Por último, y como mejor característica para comparar con la gasolina, está su número de octano. Mientras que la gasolina ronda los 93 y 98 octanos, el gas natural comprimido alcanza los 120 octanos. Como recordatorio, el número de octano mide la capacidad antidetonante del combustible. Cuanto mayor sea, mayor presión es capaz de soportar este combustible antes de detonar dentro del motor, con lo cual otorga mayor potencia y rendimiento al mencionado motor.

3.1.3. Funcionamiento

Los vehículos que utilizan gas natural comprimido constan de un MCI (Motor de Combustión Interna) similar a los de gasolina, pero adaptado para funcionar con gas. Como ya se ha mencionado, el octanaje del gas natural es superior que el de la gasolina, lo cual quiere decir que soporta mayores presiones. Motores de este tipo pueden ser adaptados para lograr mayor rendimiento que los de gasolina.

Estos vehículos constan de, como mínimo, dos tanques de almacenamiento que soportan los 250 bares de presión a los cuáles se almacena este combustible. Los tanques son cilíndricos, de pared gruesa. Al no están criogenizado, como el GNL, se encuentra almacenado a temperatura ambiente. El tiempo de recarga es similar a un vehículo convencional, con lo cual no es un aspecto especialmente diferenciador. [23]

3.1.4. Situación internacional y nacional

La estrategia seguida por la Unión Europea de sustitución de los combustibles convencionales persigue diversos objetivos. Se menciona mucho el objetivo ambiental, debido a su gran importancia hoy en día, pero existe otra ventaja estratégica, y es la disminución de la dependencia energética de Europa. Como ya se ha mencionado anteriormente (apartado 2.4.1.), Europa, y en especial España, son muy dependientes energéticamente de países externos a la unión.

Por lo tanto, considerando que este combustible es una opción viable para la sustitución de los vehículos actuales, ¿Cuál es la situación a nivel global? ¿Quiénes son los principales países productores de este combustible? Se detallan a continuación, basado en datos de 2017.

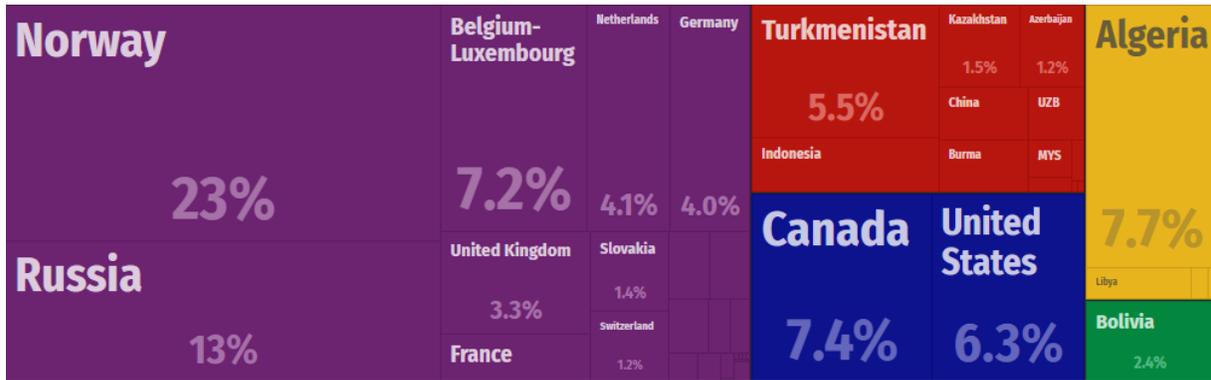


Figura 3.1: Principales países exportadores de gas natural en forma gaseosa

Fuente: Exportaciones e Importaciones mundiales de gas natural en forma gaseosa en el año 2017, por The Observatory of Economic Complexity

Los principales países exportadores de Gas Natural son, en orden de importancia [24]:

- Noruega
- Rusia
- Algeria
- Canadá
- Bélgica
- Estados Unidos
- Turkmenistán
- Holanda



Figura 3.2: Principales países importadores de gas natural en forma gaseosa

Fuente: Exportaciones e Importaciones mundiales de gas natural en forma gaseosa en el año 2017, por The Observatory of Economic Complexiry

Los principales países importadores de Gas Natural son, en orden de importancia [24]:

- Italia
- Francia
- Reino Unido
- Alemania
- Bélgica
- Estados Unidos
- China
- España

Como se puede observar, España entra dentro de los 8 primeros países importadores de gas natural, con lo cual la ventaja de obtener dependencia energética que se puede lograr sustituyendo los vehículos actuales a otros de GNC, no está tan clara.

España importa gas natural, pero también es un país exportador, en menor medida. Las importaciones de este combustible tienen origen en 3 países, de entre los cuáles una gran parte es proveniente de Algeria [25]

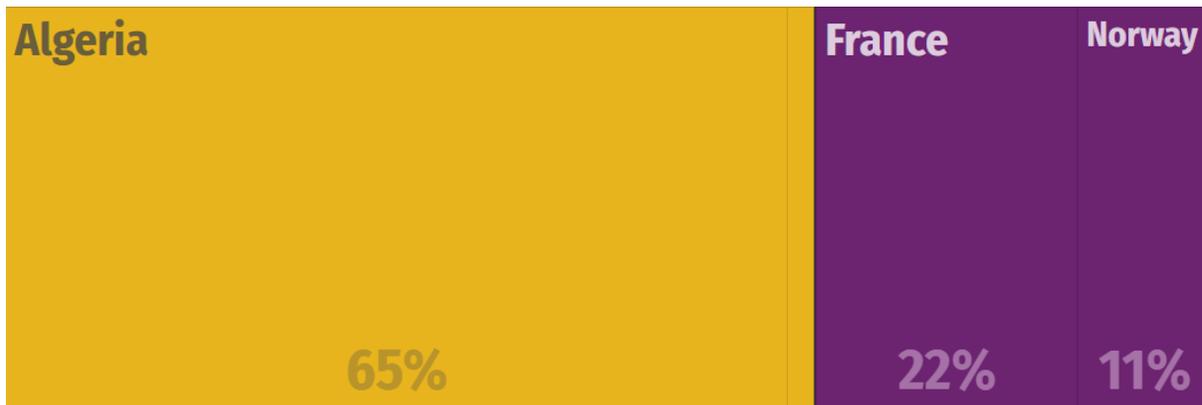


Figura 3.3: Países de origen de las importaciones de gas natural en forma gaseosa españolas

Fuente: origen de las importaciones españolas de gas natural en formato gaseoso para el año 2017, *The Observatory of Economic Complexity*

Las importaciones de gas natural en el formato de GNL, no tienen exactamente los mismos orígenes, pero si son similares. Los dos países principales son Nigeria y Francia, seguidos de Qatar, Perú, Argelia y Rusia [17].

Respecto a la parte exportadora, España exporta principalmente a Portugal, aunque es una cantidad irrisoria en comparación.

3.2. PILA DE COMBUSTIBLE

3.2.1. Propiedades

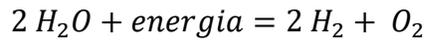
El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, y por ello es el más ligero y volátil. Es uno de los principales componentes de toda la materia existente en el universo. Se encuentra como parte de la molécula de agua, así como en moléculas orgánicas, entre otros.

A temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso, ya que su punto de ebullición se produce a los -252.7 grados Celsius. Existen dos opciones de almacenamiento, o bien criogenizado hasta esta temperatura, o bien presurizado.

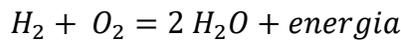
Este gas tiene una densidad de 0.071 gramos / litro a 0°C y 1 atmósfera de presión. Un dato a considerar es que es la sustancia más inflamable encontrada de forma natural en el ambiente, aunque si no se encuentra a temperaturas altas su reactividad es muy baja, siendo necesario el uso de un catalizador si se busca una reacción química [26].

3.2.2. Funcionamiento

La pila de combustible se basa esencialmente en dos reacciones químicas. En la primera de ellas, se le aporta energía a una molécula de agua, descomponiéndola en una molécula de H₂ y un átomo de oxígeno, que se combina con otro de alrededor formando una molécula de O₂.



Con esto se obtiene hidrógeno puro. En la pila de combustible se sucede la reacción inversa, Aportando oxígeno e hidrógeno, se logra hacerles reaccionar y fusionarse en moléculas de agua, generando energía eléctrica. Dicha energía se aprovecha en un motor eléctrico, logrando el movimiento del vehículo.



Una de las mayores diferencias de este “combustible” respecto a otros, es que no es un combustible como tal. Es necesario aportarle energía inicialmente para posteriormente lograr una devolución de esa energía. Por lo tanto, se considera un vector, no un combustible como tal. Sin embargo, esto convierte a este sistema en un ciclo completamente independiente al ciclo de Carnot, con lo cual la eficiencia del motor es muy superior a otros combustibles [27].

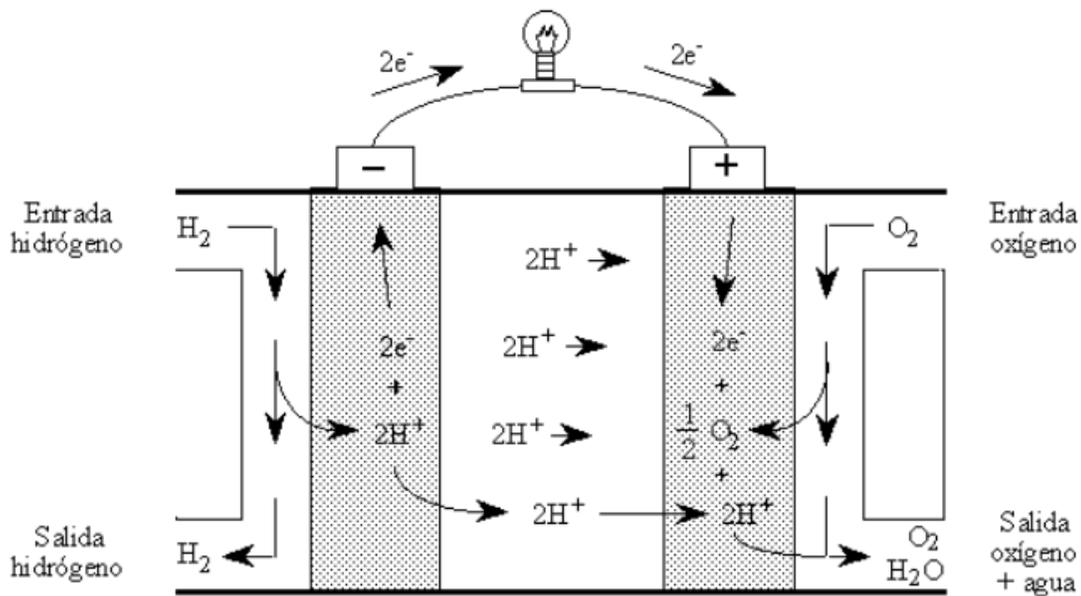


Figura 3.4: Principio de funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno

Fuente: Purificación de H₂ Obtenido del Reformado de Hidrocarburos Mediante Prox-Co, Usando catalizadores de Au/CeO₂, publicado en Innovación y Desarrollo Tecnológico, Revista Digital

Las grandes dificultades a las que se enfrenta esta tecnología son la obtención del hidrógeno y su almacenamiento en el vehículo.

3.2.3. Obtención

Existen varias vías de obtención de hidrógeno puro. Una de ellas es la explicada en el apartado 2.3.2. Funcionamiento, mediante la electrólisis del agua, en la cual se aplica energía que puede tener un origen renovable o no, en función de la fuente energética que se esté utilizando.

Pero esta solo supone el 4% de la producción mundial de hidrógeno [28]. Hoy en día, las mayores producciones de este elemento se obtienen a partir de ciertas materias primas:

- a. Hidrocarburos
- b. Aceite combustible
- c. Gas natural
- d. Crudo de petróleo

De estos cuatro posibles precursores, el Gas natural se presenta como el de mayor potencial, al contener en sus moléculas cuatro átomos de hidrógeno que pueden ser extraídos mediante reformado catalítico en dos etapas. El metano se hace reaccionar con agua mediante un catalizador de níquel, a una temperatura de 1.200 K y una presión de entre 20 y 30 bares.

Como productos de dicha reacción, se obtiene gran cantidad de hidrógeno y un poco de monóxido de carbono. Este último se hace reaccionar a su vez con vapor de agua, obteniéndose así aún más hidrógeno y dióxido de carbono.

Del crudo de petróleo se obtiene en los procesos de refinado. Existen diversas etapas que producen hidrógeno como producto resultante, por ejemplo el reformado catalítico, que se realiza para aumentar la producción de parafinas. Parte de ese hidrógeno se reutiliza en la propia planta de refinado como alimentación de otros procesos, como por ejemplo la isomerización. Sin embargo, observando el balance neto, se produce un excedente de hidrógeno.

Existe otra vía de obtención, mediante la gasificación de biomasa. Esta gasificación permite producir gas de síntesis, que puede ser revalorizado como materia prima para la producción de combustibles ligeros. Pueden ser líquidos o gaseosos, entre los cuales se encuentran el metano y el hidrógeno.

[29] [30]

3.2.4. Otros usos

Además de su uso como reactivo para la pila de combustible y en aplicaciones energéticas, el hidrógeno tiene diversos usos:

1. El principal uso es en la síntesis a nivel industrial de amoníaco, mediante el proceso de Haber-Bosch, en el que se utilizan dos reactivos, nitrógeno e hidrógeno, para formar la molécula de NH₃.



2. En el refinado de petróleo se utiliza en diversas fases del proceso. En el hidrotratamiento se eliminan del crudo elementos indeseados, como son el nitrógeno y el azufre existentes dentro de las cadenas de hidrocarburo. En el hidrocrackeo las largas cadenas hidrocarbonadas se rompen, con el objetivo de transformar fracciones pesadas en fracciones más ligeras y de mayor valor económico.
3. También en la industria química, se utiliza para la síntesis de metanol. Estos tres usos consumen aproximadamente el 66% de la producción mundial de hidrógeno.
4. También se utiliza para obtener grasas sólidas de aceites vegetales, mediante la actuación conjunta con un catalizador.
5. El isótopo de hidrógeno, el tritio, se utiliza en pinturas como fuente de radiación, para aportarles luminiscencia.
6. También se utiliza como refrigerante, ya que se expande rápidamente absorbiendo calor eficazmente.
7. En menor medida, se puede utilizar para la síntesis de ácido clorhídrico industrial.

3.2.5. Situación nacional e internacional

A diferencia de lo que ocurre con el gas natural, no existen tantos vehículos de pila de combustible de hidrógeno en España. Esto es fácilmente demostrable por el hecho de que España deja de aparecer en las listas mundiales como uno de los países con mayor importación de este producto.

Hay que tener en cuenta que las figuras que se recogen a continuación no especifican el objetivo de las exportaciones e importaciones de hidrógeno, es decir, no sólo se aplica al hidrógeno destinado a la impulsión de vehículos, sino a los movimientos mundiales de hidrógeno en general.



Figura 3.5: Principales países exportadores de hidrógeno en el año 2017

Fuente Exportaciones e Importaciones mundiales de hidrógeno en el año 2017, por The Observatory of Economic Complexity

Los principales países exportadores de hidrógeno a nivel mundial son, de mayor a menor importancia [31]:

- Estados Unidos
- China
- Alemania
- Corea del Sur
- Noruega
- Japón
- Francia
- Brasil



Figura 3.6: Principales países importadores de hidrógeno en el año 2017

Fuente Exportaciones e Importaciones mundiales de hidrógeno en el año 2017, por The Observatory of Economic Complexity



Los principales países importadores de hidrógeno a nivel mundial, de mayor a menor importancia:

- China
- Japón
- Alemania
- Corea del Sur
- Estados Unidos
- Reino Unido
- Holanda
- Singapur

Lo que se concluye es que este mercado es principalmente asiático.

Respecto a España, exportó en 2017 un total de 51,7 millones de dólares provenientes del hidrógeno. La cifra de importación es bastante similar, de 54,1 millones de dólares, con lo cual es un mercado bastante equilibrado [32] [33].

Las importaciones tienen su origen principalmente en países pertenecientes a la Unión Europea, entre ellos Holanda, Alemania y Portugal, pero también existe un gran porcentaje proveniente de China, Algeria y Estados Unidos, entre otros.

Por el contrario, las exportaciones tienen como destino prácticamente exclusivo a países de Europa, entre ellos Portugal, Reino Unido y Alemania.

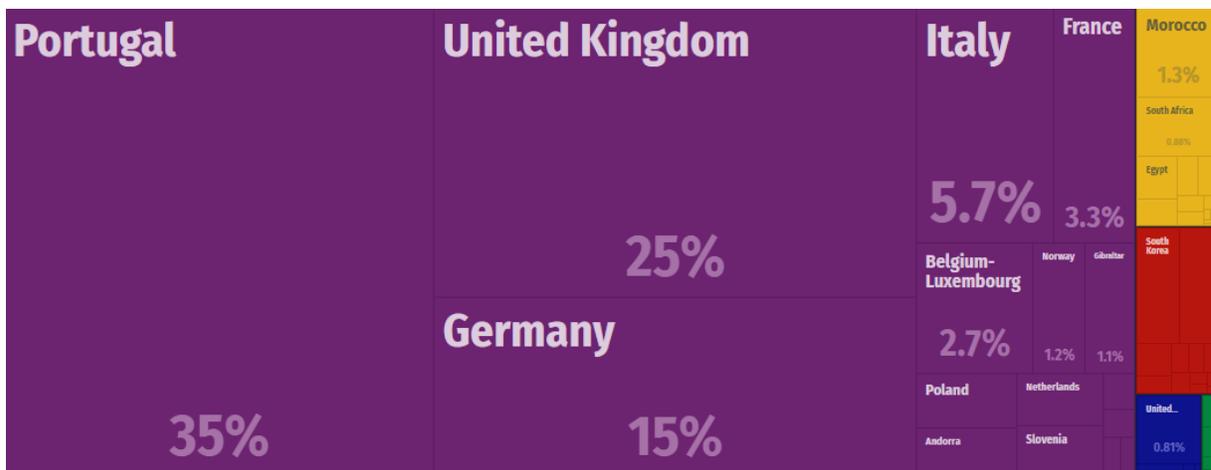


Figura 3.7: Países de destino de las exportaciones de hidrógeno españolas

Fuente: origen de las importaciones españolas de gas natural en formato gaseoso para el año 2017, The Observatory of Economic Complexity

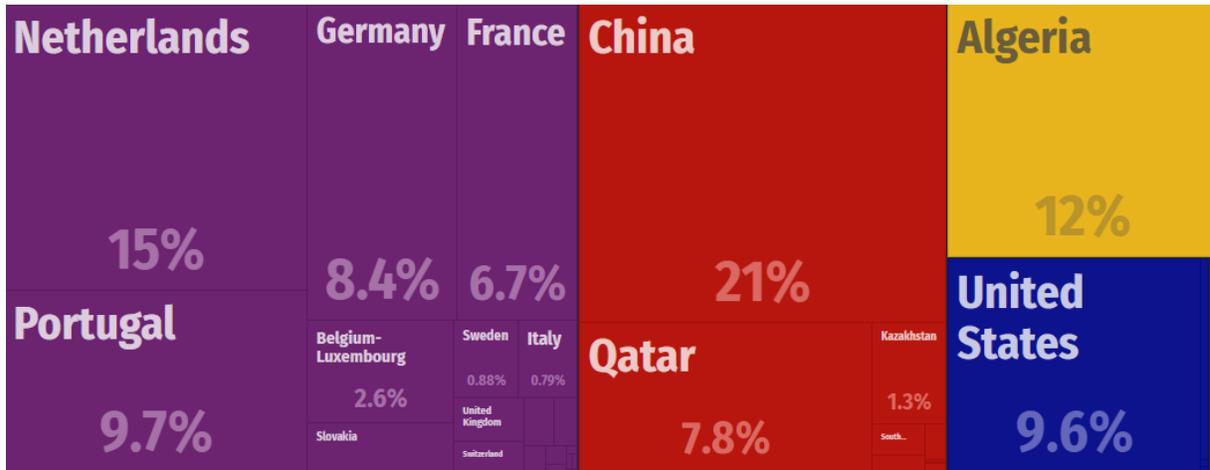


Figura 3.8: Países de origen de las importaciones de hidrógeno españolas

Fuente: origen de las importaciones españolas de gas natural en formato gaseoso para el año 2017, The Observatory of Economic Complexity

3.3. ELECTRICIDAD

La impulsión eléctrica está viviendo un gran apoyo político e institucional por parte de la Unión Europea. Es la principal apuesta que realiza la Comisión Europea para lograr los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la transición hacia una movilidad sostenible.

Por ejemplo, en España el objetivo para 2020 es que circulen más de 300.000 vehículos eléctricos. Además, los centros urbanos de ciertas ciudades tendrán prohibida la entrada a vehículos especialmente contaminantes, poniendo foco en los motores diésel y gasolina. También se plantea que, en unos pocos años, se prohíba completamente la venta de vehículos diésel y gasolina [34].

Todas estas medidas están enfocadas principalmente a los turismos, pero no hay que infravalorarlas, pues el resto de vehículos también tendrán que cumplirlas. Tal vez con unos años más de margen, pero tarde o temprano también deberán ser sustituidos.

3.3.1. Funcionamiento

El funcionamiento de los autobuses eléctricos se puede dividir en dos tipos, en función de su forma de obtención de energía.



A. Trolebus

También conocido como autobús eléctrico sin recarga eléctrica, tienen un sistema de alimentación similar a los tranvías. Constan de un sistema de catenaria por la cual se transporta la energía eléctrica, a la cual van conectados mediante un trole doble. No es una opción muy popular en Europa [35].

B. Autobús eléctrico de baterías

Gracias a las nuevas generaciones de baterías, se logra que estos autobuses tengan una autonomía que les permita cubrir el servicio de movilidad urbana durante una jornada completa. El tamaño y capacidad de la batería depende en gran medida del peso del autobús y de la autonomía que se requiere para realizar la jornada.

Para poner un ejemplo, en 2016 se anunció un modelo con una batería de 660 kWh de capacidad, que le aseguraba 560 km de autonomía, y se cargaba en tan solo 5 horas. La gran mayoría de estos modelos cuentan con freno regenerativo, por ello la eficiencia de este tipo de vehículos es mucho más alta que la de cualquier otro vehículo impulsado por combustibles [36].

3.3.2. Situación nacional e internacional

EL mercado eléctrico español está altamente conectado con sus países limítrofes, Francia, Andorra, Portugal y Marruecos. Son con estos cuatro países con los que se compra y vende energía, en función de la oferta y la demanda del sistema eléctrico.

El organismo encargado de regular y gestionar el tráfico en las interconexiones eléctricas en España es REE, Red Eléctrica de España. En las siguientes figuras, extraídas del Informe Anual del Sistema Eléctrico Español de 2018, se puede observar los principales movimientos [37].

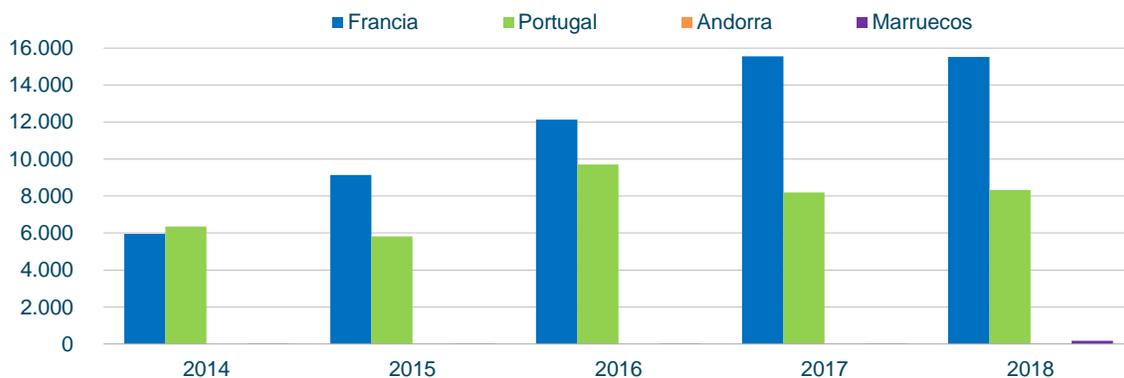


Figura 3.9: Evolución anual de las importaciones de energía eléctrica (GWh)



Fuente: Informe Anual del Sistema Eléctrico Español 2018, de Red Eléctrica de España.

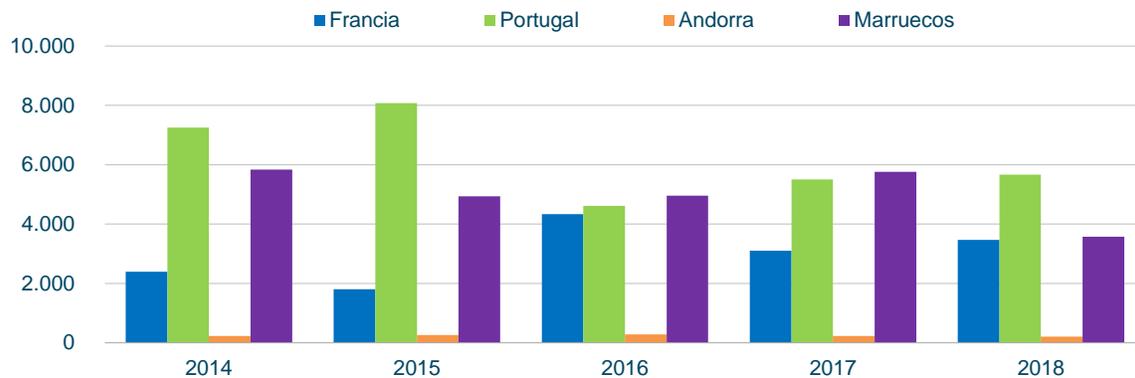


Figura 3.10: Evolución anual de las exportaciones de energía eléctrica (GWh)

Fuente: Informe Anual del Sistema Eléctrico Español 2018, de Red Eléctrica de España.

Como se puede observar, las exportaciones se mantienen más o menos constantes a lo largo de los años, reduciéndose en el último año (2018). Sin embargo, las importaciones aumentan cada año, principalmente con origen en Francia.

Al igual que se comentaba en el apartado 3.1.4., la independencia energética tiende a empeorar al realizar estos cambios en la movilidad. Sin embargo, las importaciones provienen de países pertenecientes a la Unión Europea, por lo que en principio la actual independencia energética de Europa no se ve comprometida.



En lo referente a España, la generación eléctrica proviene de un mix de fuentes energéticas. En la siguiente figura se presentan porcentajes de generación a lo largo del año 2018. Como se puede observar, con origen no renovable se obtiene aproximadamente el 60% de la energía total generada, mientras que la generación renovable asciende al 40%.

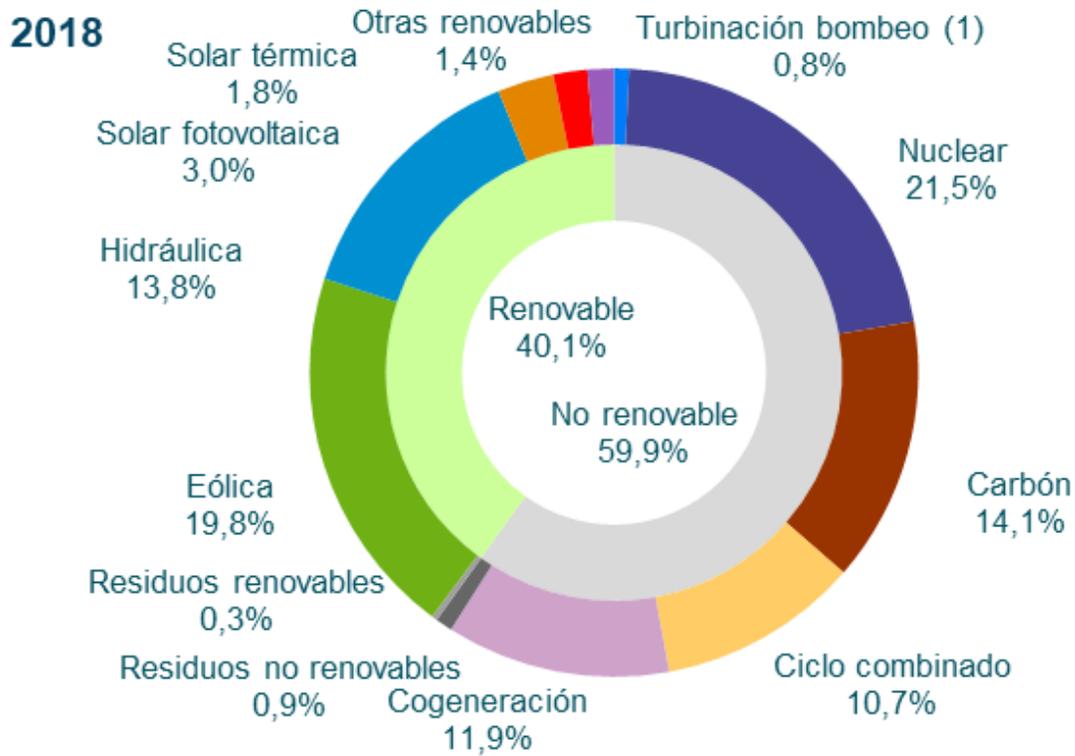


Figura 3.11: Estructura de la generación eléctrica peninsular de 2018

Fuente: Informe Anual del Sistema Eléctrico Español 2018, de Red Eléctrica de España.



4. SITUACIÓN ACTUAL DEL PARQUE DE AUTOBUSES

Los autobuses son una pieza clave en los planes de movilidad urbana sostenible planteados. Se considera transporte colectivo todo aquel que está capacitado para transportar a un gran número de viajeros, independientemente de si su origen es público o privado. Cobra especial importancia debido a que facilita la reducción del tránsito de automóviles privados, además de mejorar la calidad ambiental. Un ejemplo es el Plan de Movilidad Urbana Sostenible de la ciudad de Madrid, que combina el metro con la red de servicio de autobús urbano, con aproximadamente 775 km de recorrido total [38].

4.1. PARQUE DE AUTOBUSES EN ESPAÑA

Los autobuses suponían en 2017 el 0,2% del total de vehículos terrestres matriculados, con una cuantía de 63.589 autobuses de cualquier tipo de impulsión a lo largo del territorio español.

La DGT (Dirección General de Tráfico) distingue en su clasificación entre autobuses de gasolina, autobuses diésel, y autobuses con métodos de impulsión alternativos. El parque con menor número de vehículos matriculados es el de gasolina. Desde 2006, y con mucha probabilidad desde años anteriores, se ha mantenido en un descenso continuado de autobuses, alcanzando en 2017 las 240 unidades [39].

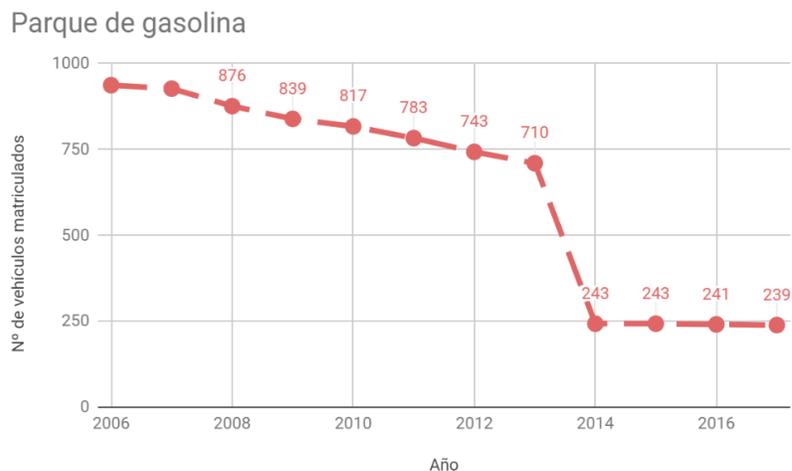


Figura 4.1: Evolución anual del parque de autobuses de gasolina

Fuente: Datos de vehículos matriculados de la Dirección General de Tráfico

El parque de autobuses diésel es, de lejos, el mayor protagonista. En comparación, los otros dos parques son prácticamente inexistentes. Siguiendo la tendencia que han seguido todos los vehículos terrestres de transporte por carretera, el diésel es el predominante, alcanzando en 2017 las 61.336 unidades matriculadas.

Parque de diésel

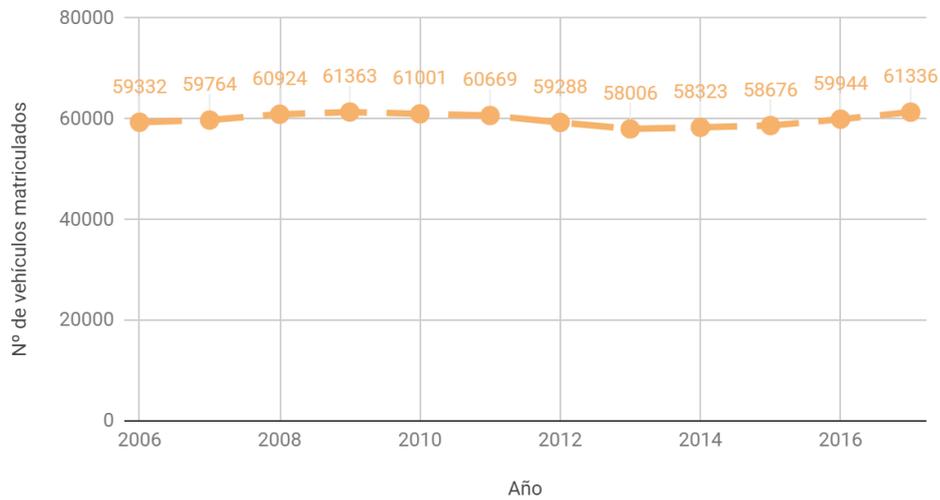


Figura 4.2: Evolución anual del parque de autobuses diésel

Fuente: Datos de vehículos matriculados de la Dirección General de Tráfico

Por otro lado, el parque de autobuses con métodos de impulsión alternativos, pese a contar actualmente con un escaso número en comparación al parque de diésel, ha tenido una evolución muy positiva. En comparación al 2016, el crecimiento experimentado en este parque durante el año 2017 alcanza una variación del 121%.

Se consideran alternativos a todo aquel método de impulsión externo al diésel o la gasolina, esto es híbridos, de pila de combustible, eléctricos, de gas natural, de gases licuados de petróleo y de biocombustibles.

Parque de alternativos

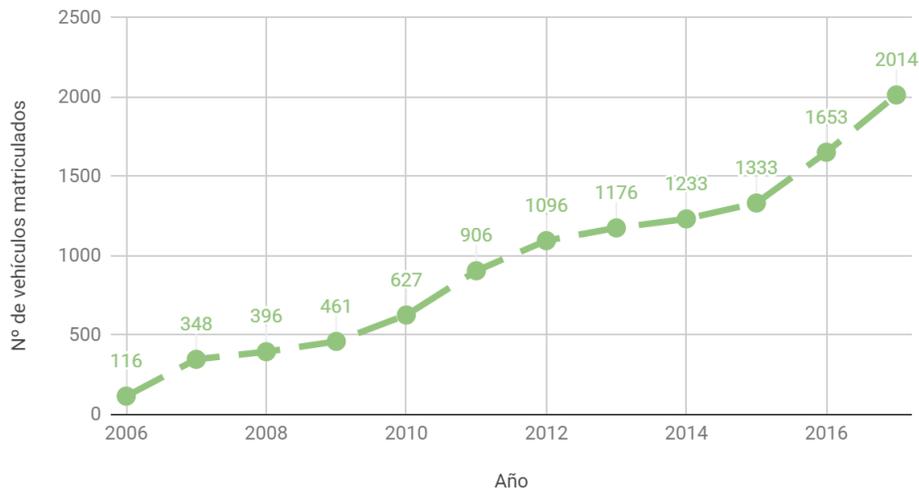


Figura 4.3: Evolución anual del parque de autobuses con métodos de impulsión alternativos

Fuente: Datos de vehículos matriculados de la Dirección General de Tráfico

Si este crecimiento se mantiene o aumenta en los próximos años, es probable que la movilidad urbana en autobús esté prácticamente en su totalidad basada en métodos alternativos.

4.2. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS

El objetivo general de este estudio es la determinación de la opción más viable para la empresa privada, y para ello se proponen una serie de estudios previos, realizados por otros autores, en los cuales se realizan comparaciones entre diferentes autobuses.

Es necesario recalcar que los estudios han sido seleccionados partiendo de la premisa de obtener la mayor cantidad de información posible, independientemente del país de origen. Esto es debido a que en lo referente a España, muchos estudios existentes son confidenciales o de previo pago. En este estudio se ha tratado en todo momento de obtener la información de fuentes de dominio público que, dentro de lo posible, aportasen datos y cifras numéricas de costes reales.

En este estudio, estas fuentes se han utilizado como punto de partida para desarrollar una metodología de cálculo de costes propia. Las figuras y gráficos que se presentan en este apartado son de elaboración propia, y ha sido labor del autor homogeneizar y comparar los datos extraídos de dichos estudios para obtener unas conclusiones que engloben los tres tipos de movilidad.



EL primer estudio seleccionado, es el realizado por Jamie Ally y Trevor Pryor en el año 2016, como trabajo de investigación para la Universidad de Murdoch, Australia, cuyo título es *“Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study.”* [40].

En él analizan y comparan tres tipos de movilidad, dos de los cuales son recurrentes en este estudio. La principal característica de este trabajo de investigación es que aporta una gran variedad de datos numéricos reales. En el apartado 7. Anexos, se adjuntan los datos numéricos facilitados por este estudio y los siguientes.

El segundo estudio seleccionado es el realizado por el doctor Jorge Luiz de Sá Riechi en 2018, como tesis doctoral por la Universidad Politécnica de Valencia para el departamento de máquinas y motores térmicos, cuyo título es *“Desarrollo de un modelo para la optimización del reemplazo de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros”* [41].

En esta tesis se plantea un modelo de cálculo de costes, que no es originario de este autor, pero sí que ha sido modificado y detallado por él, para adaptarlo a una flota de autobuses. El método que se utiliza en el ejemplo práctico del apartado 4.4. se detalla en el apartado anterior, 4.3., y parte de la base del planteado aquí, denominado LCC (Life Cycle Cost, coste del ciclo de vida).

En este documento también se realiza un muy buen ejemplo de aplicación de este método a una posible flota de gas natural comprimido, con lo cual también aporta datos numéricos fiables en los cuales se sustenta el ejemplo práctico posteriormente planteado.

El tercer estudio seleccionado también realiza una compilación de diferentes métodos de impulsión, y aporta una visión muy detallada de los autobuses de impulsión eléctrica. Es el artículo científico realizado por Antti Lajunen y Timothy Lipman, publicado por Elsevier en Julio de 2016, cuyo título es *“Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses”* [42]

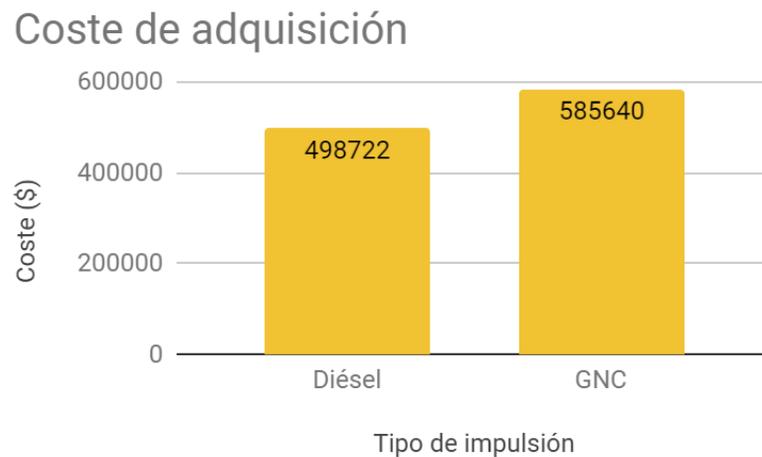
También se utilizan otras fuentes bibliográficas, de menor importancia, que se irán detallando a lo largo del desarrollo del apartado.



4.2.1. Gas Natural Vehicular

Los costes que se van a tener en cuenta son principalmente tres, el coste de adquisición, el coste de mantenimiento y el coste del combustible en cuestión (que a su vez dependerá del consumo de combustible).

Para el caso del gas natural, se van a mantener los datos obtenidos por los autores [40], aunque cabe destacar que el precio del combustible difiere mucho del que existe actualmente en España, lo cual va a suponer una gran diferencia que se detallará en el ejemplo práctico.



*Figura 4.4: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús a GNC
Fuente: Elaboración propia en base a [40]*

En el primer estudio se detallan los costes de adquisición, en dólares australianos, de dos autobuses equivalentes, uno en versión diésel, y otro en versión de GNC. Se puede observar que el coste de adquisición del autobús de GNC es aproximadamente un 17,5 % mayor que su versión diésel.



Coste de mantenimiento

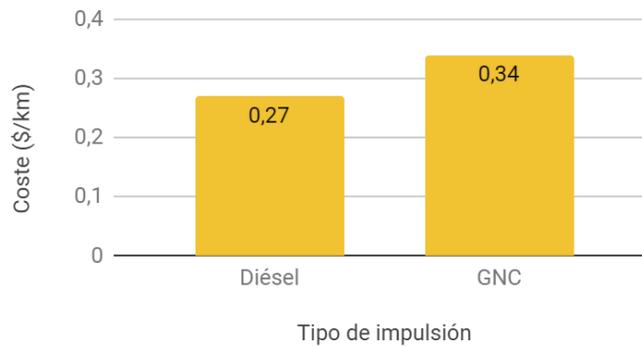


Figura 4.5: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús a GNC

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

El coste de mantenimiento también resulta más elevado, en concreto un 25,9% mayor. A la hora de evaluar el LCC, va a depender en gran medida de la distancia que se haya recorrido con el autobús objeto de estudio, ya que tanto los costes de mantenimiento como el coste de combustible dependerán de la cantidad de km recorridos.

Consumo de combustible

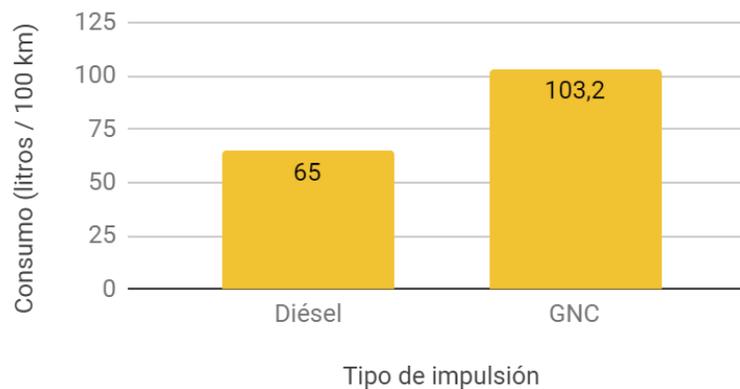


Figura 4.6: Comparativa del consumo de combustible entre un autobús diésel y un autobús a GNC

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

En la siguiente figura se aprecia el precio medio de ambos combustibles en Australia en el año 2016. Aunque es completamente lo contrario a lo que ocurre en España, ya que aquí el precio del GNC es bastante menor que el precio de diésel, para este apartado se va a mantener así.



Se considerarán precios actuales en el ejemplo práctico.

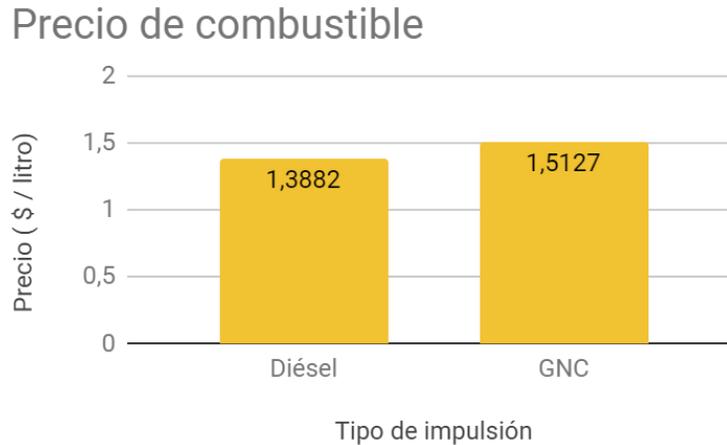


Figura 4.7: Comparación del precio de combustible entre diésel y GNC en Australia en el año 2016

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

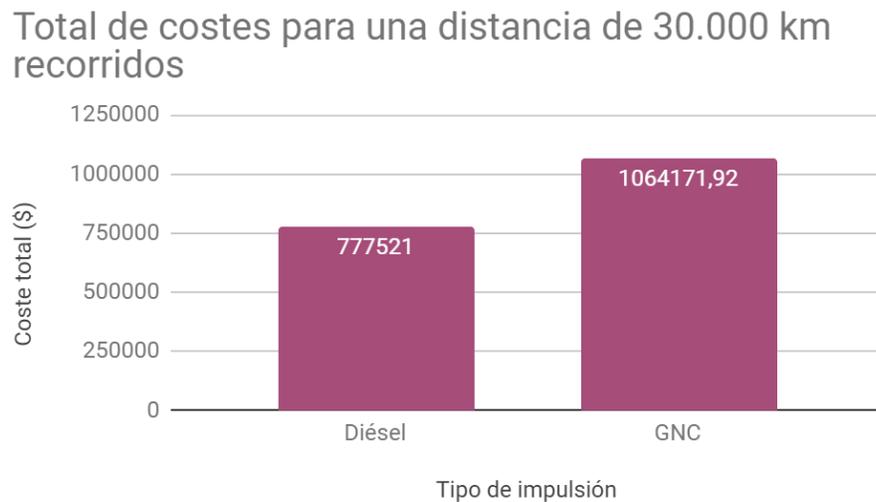


Figura 4.8: Comparativa de LCC para una distancia recorrida de 30.000 km entre un autobús diésel y un autobús a GNC

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

Como se ha mencionado anteriormente, el LCC depende de la distancia total recorrida. En este caso, los autores han optado por un recorrido de 30.000 km, lo cual no es realmente representativo del ciclo de vida de un autobús urbano, sólo es una muestra.



En este ejemplo no va a suponer mucha diferencia plantear una distancia mayor, debido a que el precio del combustible alternativo es superior al diésel, pero con precios españoles no va a dar el mismo resultado. Al ser los precios del GNC inferiores a los del diésel, es posible determinar cuánta distancia se necesita recorrer con este autobús para que iguale, o incluso supere la rentabilidad de un autobús diésel. Pero se planteará en el ejemplo práctico.



4.2.2. Pila de Combustible: Hidrógeno

En el primer estudio [40], se plantean dos tipos de HFCB (Hydrogen Fuel Cell Bus). En el año 2016 esta tecnología era muy puntera y novedosa, con lo cual sus precios eran desorbitados. Los precios que se recogen a continuación son estimaciones de los autores de dicho estudio de los precios que podría tener esta tecnología en 2020. Se han considerado estos precios al ser más cercanos en el tiempo al año de redacción de este estudio, 2019.

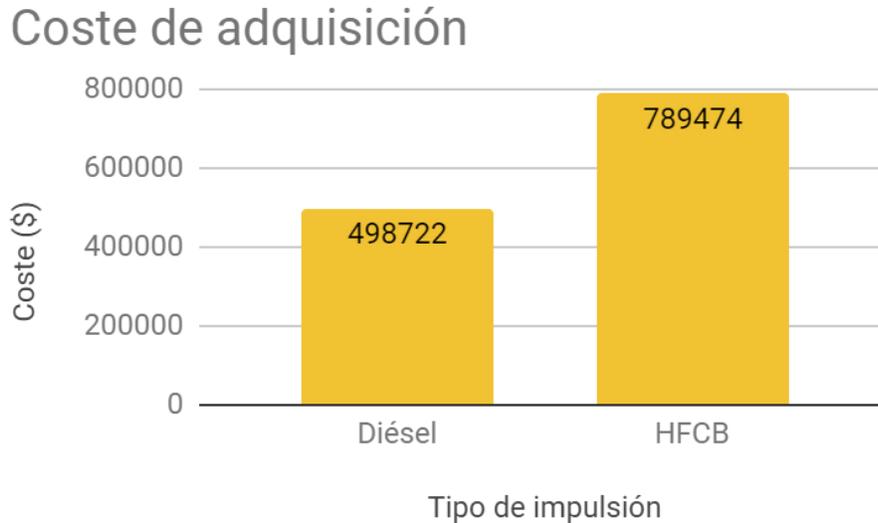


Figura 4.9: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

Aun así, el coste de adquisición sigue siendo bastante elevado, en concreto un 58,3% más caro que su equivalente en diésel.



Coste de mantenimiento

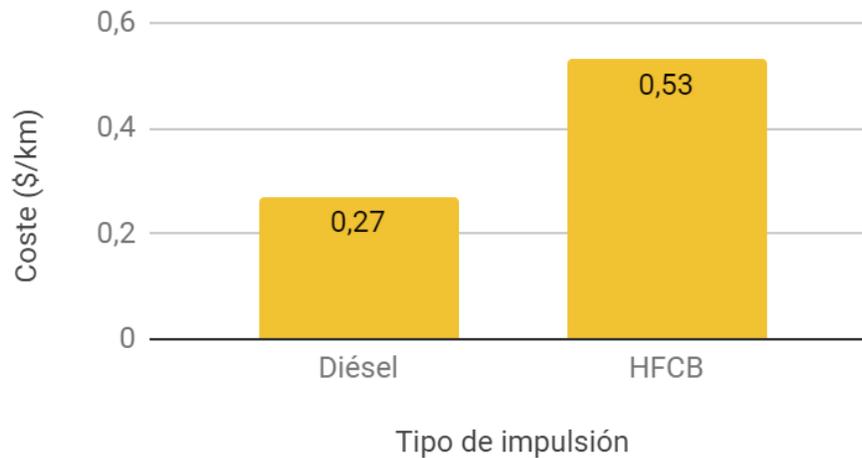


Figura 4.10: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

Los costes de mantenimiento también son bastante elevados en comparación, alcanzando un 96,3% sobre el coste de un autobús diésel, casi el doble.

Consumo de combustible

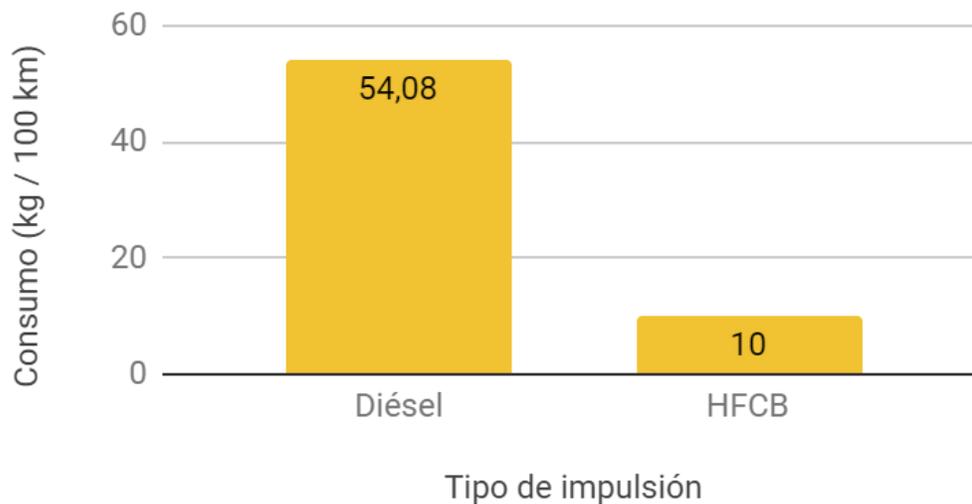


Figura 4.11: Comparativa del consumo de combustible entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno

Fuente: Elaboración propia en base a [40]



Sin embargo, he aquí la gran baza de esta tecnología. El consumo es muchísimo menor. Para comparar con las mismas unidades, se ha pasado el consumo de diésel a kg / 100 km, suponiendo una densidad del diésel 0,832 kg / litro. Tal y como se observa en la figura, el consumo es un 81,5% inferior. Para los precios medios de hidrógeno para automoción de Australia en 2016:

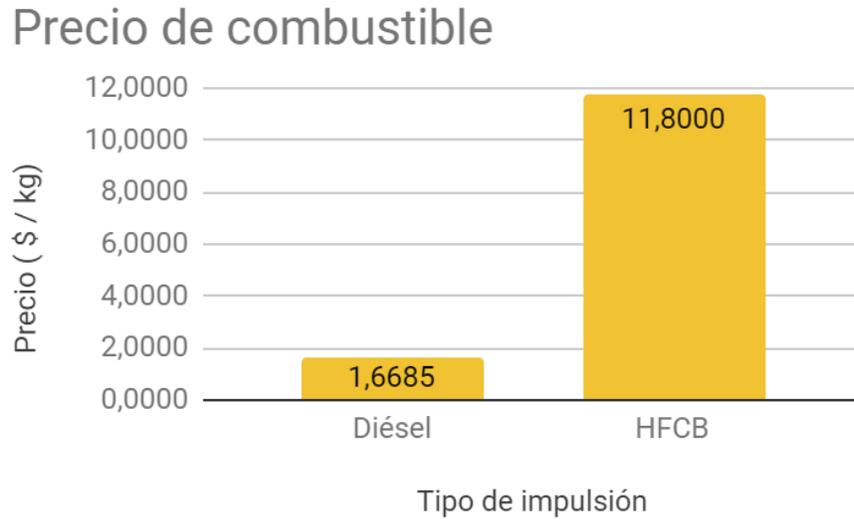


Figura 4.12: Comparativa de precios de combustible diésel e hidrógeno para automoción para Australia en 2016.

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

Se vuelve a observar una grandísima diferencia. El precio del diésel también se ha cambiado de unidades para poder compararlos. En el ejemplo práctico se contemplarán precios actuales de España, lo que permitirá saber si esta tecnología es económicamente viable.

Total de costes para una distancia de 30.000 km recorridos

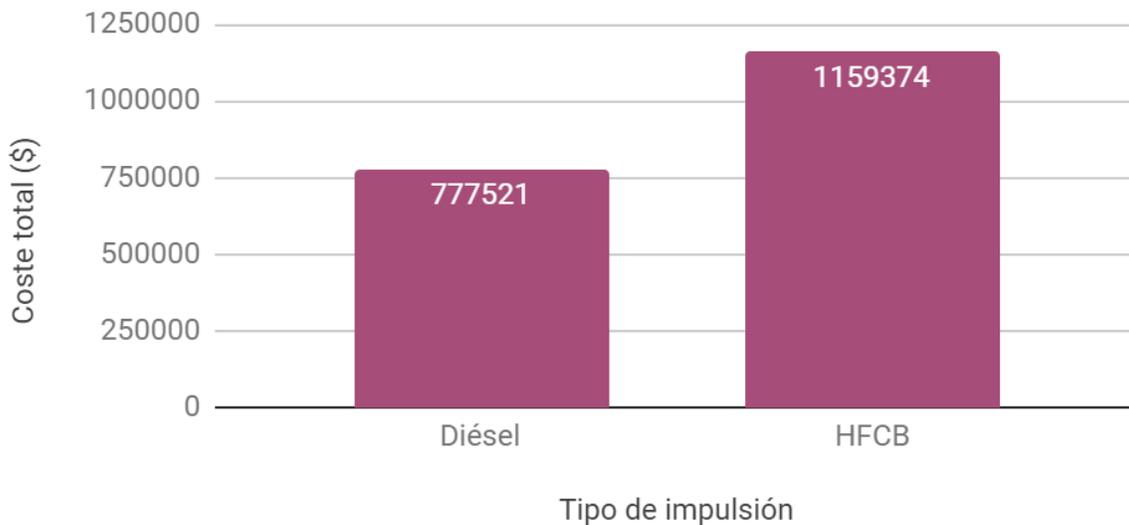


Figura 4.13: Comparativa de LCC entre un autobús diésel y un autobús de pila de combustible de hidrógeno para una distancia recorrida de 30.000 km

Fuente: Elaboración propia en base a [40]

Al igual que ocurría en el apartado anterior, los costes totales dependerán de la distancia recorrida. Por lo tanto el resultado de este estudio se podrá detallar mucho más.

4.2.3. Impulsión eléctrica

En el tercer estudio [42] se aportan datos reales de autobuses de impulsión eléctrica, en base a los cuales se realizan las figuras a continuación. En este caso, los autores optaron por un autobús diésel de 300.000 US\$, y un autobús eléctrico de tipo BEB (Battery-electric Bus) con una batería de 330 kWh de capacidad, diseñada para aguantar 12h de servicio continuado.

En el precio de adquisición se incluye la batería, pero en los costes de mantenimiento no se contemplan los recambios de dicha batería, es un coste que habrá que tener en cuenta más adelante.

En este caso los autores optan por una distancia recorrida de 800.000 km, mucho más realista, correspondiente en su caso a una vida útil de 12 años. Se calcula que las baterías de autobús deben ser cambiadas a los 10 años, con lo cual posteriormente se calculará el LCC considerando una batería más.



Para datos de 2016, el precio de las baterías se regía por el precio/ kWh de capacidad, en este caso se indica que era de 600\$ / kWh, considerando así un coste de batería de 198.000 \$.

Tampoco se incluyen los costes de las infraestructuras de carga, solamente del autobús en sí.

Coste de adquisición

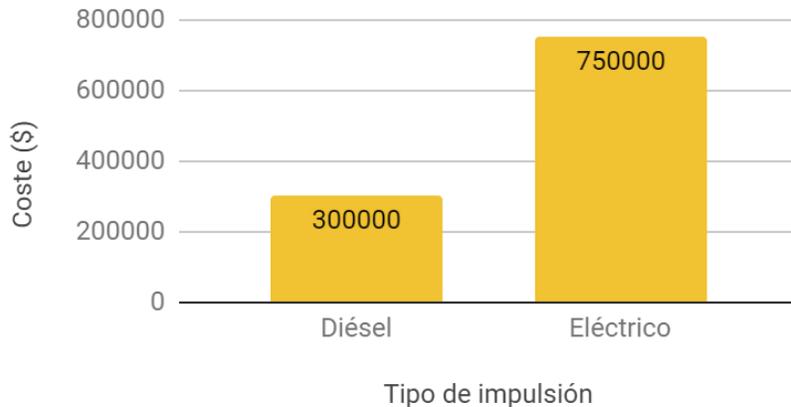


Figura 4.14: Comparativa del coste de adquisición entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería

Fuente: Elaboración propia en base a [42]

El coste de adquisición de un autobús eléctrico era un 150% superior respecto a su versión en diésel, según datos de 2016.

Coste de mantenimiento

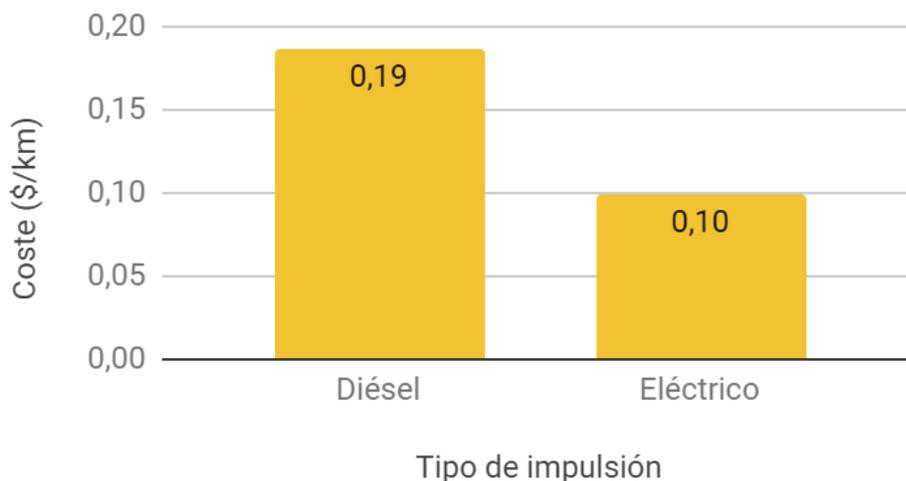


Figura 4.15: Comparativa del coste de mantenimiento entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería Fuente: Elaboración propia en base a [42]

El coste de mantenimiento no viene especificado en este artículo, por lo que se utiliza otra fuente bibliográfica [43], en la cual se indica que el mantenimiento de un autobús eléctrico es aproximadamente un 67% inferior a su homólogo diésel.

Consumo de combustible

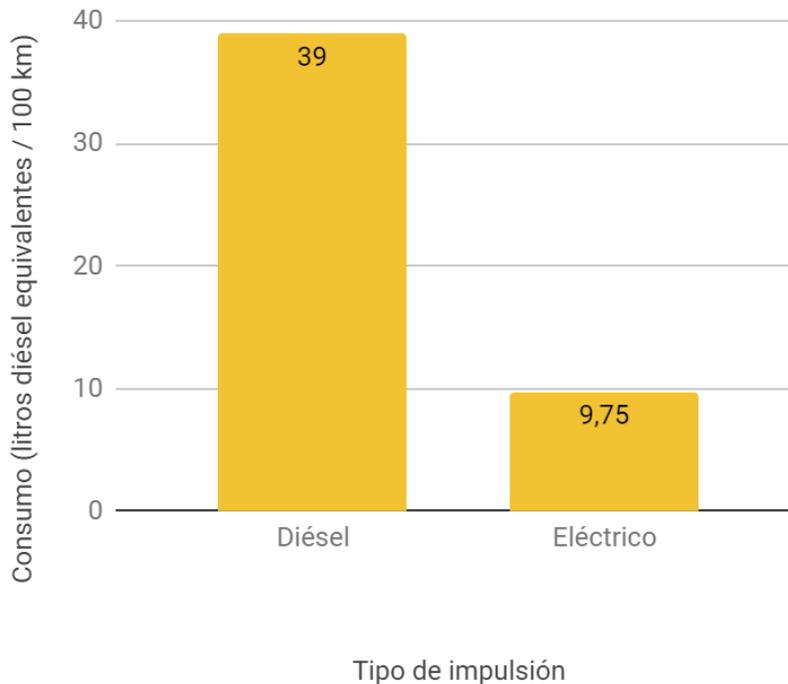


Figura 4.16: Comparativa del consumo equivalente de combustible entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería

Fuente: Elaboración propia en base a [42]

Para poder comparar entre consumos, es necesario transformar a las mismas unidades. Se estima que el consumo de un autobús eléctrico sea un 75% inferior que el consumo de diésel [43], debido principalmente a la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía del motor y la energía ahorrada por la capacidad regenerativa de la batería.

Teniendo en cuenta que el diésel consume 39 litros cada 100 km, el eléctrico debería consumir el equivalente a 9,75 litros de diésel a los 100 km. Esto se traduce, suponiendo una densidad del diésel de 0,832 kg/litro y un poder calorífico de 43 MJ/kg, en que el eléctrico consume 348,82 MJ/100km, que equivale a 97 kWh/100km.



Precio de combustible

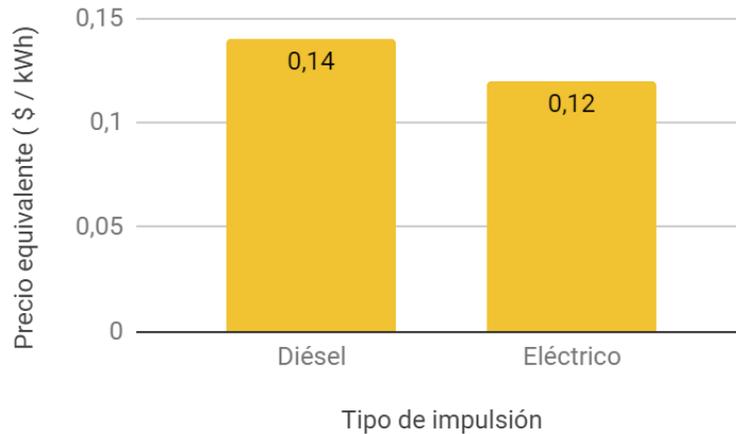


Figura 4.17: Comparativa del precio de combustible equivalente entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería

Fuente: Elaboración propia en base a [42]

En función del precio de la electricidad considerado en dicho estudio, que se corresponde a precios de California en 2014, se obtiene el coste asociado al consumo del autobús eléctrico.

En los gráficos, para realizar una comparativa entre las mismas unidades, se transforman los litros de diésel en kWh, suponiendo el poder calorífico indicado previamente. Es decir, el autor considera un precio del diésel de 1,3882 \$/litro, que equivaldría a:

$$\frac{1.3882 \$}{1 \text{ litro}} = \frac{1.3882 \$}{0.832 \text{ kg} * 43 \text{ MJ/kg}} = \frac{1.3882 \$}{35.776 \text{ MJ}} = \frac{1.3882 \$}{9.94 \text{ kWh}} = 0.14 \text{ $/kWh}$$



Total de costes para una distancia de 30.000 km recorridos

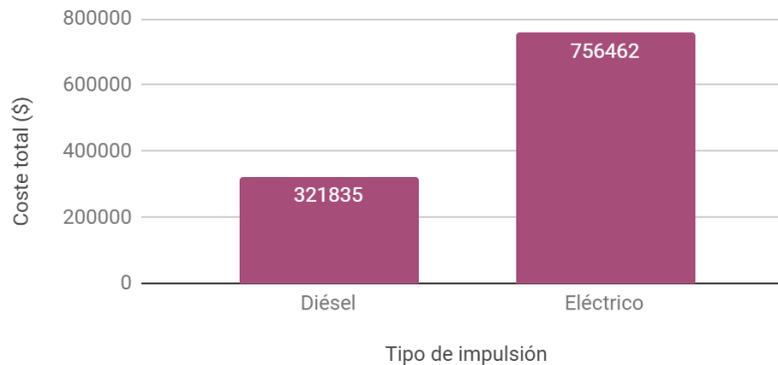


Figura 4.18: Comparativa del LCC entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería considerando una distancia recorrida de 30.000 km

Fuente: Elaboración propia en base a [42]

Para realizar una comparativa con los apartados anteriores, se calculan los costes totales para una distancia de 30.000 km, pero como ya se ha mencionado en el estudio se consideraban 800.000 km recorridos. Al comparar ambas figuras, es obvio que la distancia recorrida es la principal variable que va a influir en el LCC, ya que considerando 800.000 km, la opción eléctrica se acerca bastante a los costes que conlleva el autobús diésel.

Total de costes para una distancia de 800.000 km recorridos

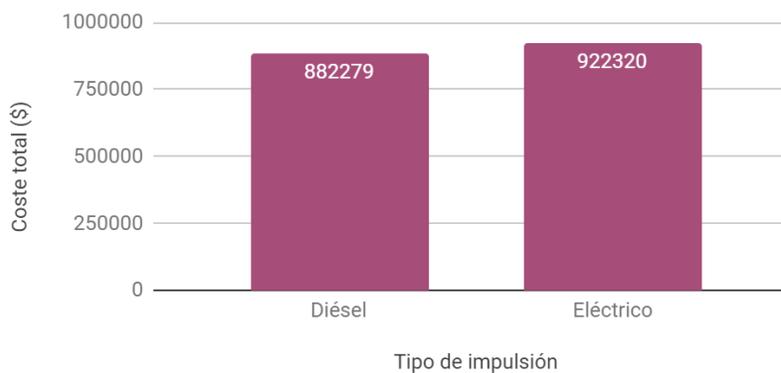


Figura 4.19: Comparativa del LCC entre un autobús diésel y un autobús eléctrico de batería considerando una distancia recorrida de 800.000 km

Fuente: Elaboración propia en base a [42]



4.3. METODOLOGÍA UTILIZADA

Para una correcta evaluación de la viabilidad de cada una de las tres alternativas se propone como herramienta el análisis de los costes del ciclo de vida de los vehículos. Para ello se va a utilizar el método presentado en la norma UNE-EN 60300-3-3: Gestión de la confiabilidad, cálculo del coste del ciclo de vida [44], que define este coste como:

“El cálculo del coste del ciclo de vida es el proceso de análisis económico para determinar el coste de adquisición, propiedad y eliminación de un producto. Puede aplicarse al ciclo de vida completo del producto o a partes o combinaciones de diferentes fases de su ciclo de vida”

La metodología que se va a utilizar para estimar la solución más viable se basa en el método de cálculo del coste del ciclo de vida (LCC, *Lyfecycle cost*). Este método parte de una sencilla ecuación:

$$LCC = C.A. + C.O. + C.E.$$

Donde C.A. es el coste de adquisición, C.O. el coste de operación, y C.E. el coste de eliminación, si lo hubiera.

Aplicado al objeto de estudio de este análisis, es decir a vehículos de transporte colectivo de viajeros por carretera, los tres costes anteriormente citados se pueden desglosar en los siguientes.

El coste de adquisición contempla el precio de compra del vehículo.

El coste de operación contempla siete costes asociados:

- Coste de neumáticos
- Coste de combustible
- Coste de mantenimiento (preventivo y correctivo)
- Coste de revisiones
- Seguro obligatorio
- Cuantía de los impuestos aplicados, entre ellos matriculación y circulación
- Coste de infraestructura, entendiéndose como tal, todo aquel bien o servicio necesario para el correcto funcionamiento de los vehículos

El coste de eliminación no procede, ya que en este caso la eliminación del vehículo no conlleva ningún coste remarcable.



4.3.1. Cálculo de costes

Para la realización de este análisis se tendrán en cuenta los siguientes tres costes:

- Conste de adquisición
- Coste de mantenimiento
- Coste de combustible

Los datos facilitados por la empresa son de siete autobuses distintos cuyas características se listan a continuación.

Autobús 1:

- Vida útil de 16 años
- 34 plazas
- Calificación ECO 4
- Precio de adquisición de 130.000€
- Potencia del motor 240 CV
- Autonomía de 650 Km
- Distancia recorrida en el 2018 45.592Km

Autobús 2:

- Vida útil de 16 años
- 19 plazas
- Calificación ECO 4
- Precio de adquisición de 90.000€
- Potencia del motor 180 CV
- Autonomía de 650 Km
- Distancia recorrida en el 2018 51.355Km

Autobús 3:

- Vida útil de 16 años
- 56 plazas
- Calificación ECO 5
- Precio de adquisición de 238.120€
- Potencia del motor 430 CV
- Autonomía de 1.450 Km
- Distancia recorrida en el 2018 75.417Km



Autobús 4:

- Vida útil de 16 años
- 83 plazas
- Calificación ECO 6
- Precio de adquisición de 301.356€
- Potencia del motor 490 CV
- Autonomía de 1.200 Km
- Distancia recorrida en el 2018 63.561Km

Autobús 5:

- Vida útil de 16 años
- 61 plazas
- Calificación ECO 6
- Precio de adquisición de 256.500€
- Potencia del motor 440 CV
- Autonomía de 1.400 Km
- Distancia recorrida en el 2018 74.416 Km

Autobús 6:

- Vida útil de 16 años
- 64 plazas
- Calificación ECO 6
- Precio de adquisición de 252.000€
- Potencia del motor 470 CV
- Autonomía de 1400 Km
- Distancia recorrida en el 2018 81.116Km

Autobús 7:

- Vida útil de 16 años
- 61 plazas
- Calificación ECO 6
- Precio de adquisición de 293.000€
- Potencia del motor 460 CV
- Autonomía de 1.700 Km
- Distancia recorrida en el 2018 87.667Km

Consideraciones a tener en cuenta:

Debido a que se va a realizar una comparación entre diferentes tecnologías, existen algunos costes que no se van a tener en cuenta debido a que su variación no depende del tipo de tecnología. Es el caso de, por ejemplo, el coste de revisiones, seguros y neumáticos.



En el caso de los impuestos y tasas, varían ligeramente debido a medidas gubernamentales en favor de ciertas tecnologías, pero no se asegura que un futuro sigan estando exentas de ellas. Además, no es una cifra relevante en comparación con los tres costes principales mencionados al principio del apartado.

Debido a la falta de disponibilidad de datos, el suministro de combustible se supondrá externo, pese a que la empresa que facilita los datos consta actualmente de un depósito privado. Con esto obtiene un precio más bajo que el que se va a tener en cuenta en este estudio, que será el precio medio del gasóleo de automoción en España en el año 2018.

4.4. RESULTADOS PROPIOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA A UN EJEMPLO PRÁCTICO

4.4.1. Gas Natural Vehicular

Para la realización de esta comparación, se han tomado datos numéricos de dos estudios, [41] y [40].

Para obtener el coste de adquisición de los autobuses de GNC que equivalen a los autobuses diésel, se multiplica el precio de compra facilitado por la empresa por un factor de conversión.

Este factor se obtiene realizando un promedio de la diferencia (en % sobre el precio del autobús diésel) de precio que supone el modelo de GNC escogido por los estudios.

Por ejemplo:

Adquisición de autobús diésel: 498.000 \$

Adquisición de autobús a GNC: 585.000 \$

$$F.C. = \frac{585.000}{498.000} = 1,1747$$

En el caso de este ejemplo, el modelo equivalente a GNC sería un 17,47% más caro que su versión diésel.

Teniendo en cuenta el promedio realizado con el resto de datos, se obtiene un factor de conversión medio de 1,1513, obteniendo la siguiente comparación:

Tabla 4.1: Comparación del coste de adquisición total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC

	COSTE DE ADQUISICIÓN	
	Diésel	GNC
Autobus 1	130.000	149.674
Autobus 2	90.000	103.620
Autobus 3	238.120	274.156
Autobus 4	301.356	346.962
Autobus 5	256.500	295.318
Autobus 6	252.000	290.137
Autobus 7	293.000	337.342
Total flota	1.560.976	1.797.210

Para el caso del coste de mantenimiento de los autobuses diésel, no se han facilitado datos por parte de la empresa, por lo que se opta por tomar los valores sugeridos por el ministerio de fomento en el documento de guía para el observatorio de costes del transporte de viajeros [45] de 2005. En él se dividen estos autobuses en cuatro grupos, diferenciados por el número de plazas:

- a. Más de 55 plazas
- b. De 39 a 55 plazas
- c. De 26 a 38 plazas
- d. Hasta 25 plazas

Para el primer tipo, sugiere un coste de mantenimiento de 0,1160 € / km recorrido, para el segundo de 0,1003 €/km, para el tercero de 0,0867 €/km, y para el cuarto de 0,0794 €/km.

Por lo tanto, en este caso existen cinco autobuses de más de 55 plazas (3, 4, 5, 6 y 7), uno en el rango de 26 a 38 plazas (1), y otro en el rango de hasta 25 plazas (2). Para obtener este coste a lo largo de todo el ciclo de vida, se considera que la ruta seguida por cada autobús es similar cada año, y por lo tanto también la distancia recorrida, a lo largo de los 16 años de servicio que tiene cada autobús.

Al igual que se realiza con el coste de adquisición, el factor de conversión a GNC se obtiene realizando promedios de las diferencias existentes en los datos de ambos estudios, obteniendo un factor de 1,3896.

A continuación se encuentran los valores obtenidos tras la aplicación de lo anteriormente descrito:



Tabla 4.2: Comparación del coste de mantenimiento total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC

Nº plazas	COSTE DE MANTENIMIENTO		
	> 55	26 - 38	< 25
Coste diesel (€/km)	0,1160	0,0867	0,0794
Coste GNC (€/km)	0,1612	0,1205	0,1103

	(km/año)	Mantenimiento diésel (€/año)	Mantenimiento GNC (€/año)
Autobus 1	43.592	3.779	5.252
Autobus 2	51.355	4.078	5.666
Autobus 3	75.417	8.748	12.157
Autobus 4	63.561	7.373	10.246
Autobus 5	74.416	8.632	11.996
Autobus 6	81.116	9.409	13.076
Autobus 7	87.667	10.169	14.132
Total (16 años)		835.033	1.160.386

Para el coste de combustible se utilizan los datos de consumo anual facilitados por la empresa. Es remarcable que todos los autobuses tienen un perfil de consumo a lo largo del año similar al siguiente en proporciones:

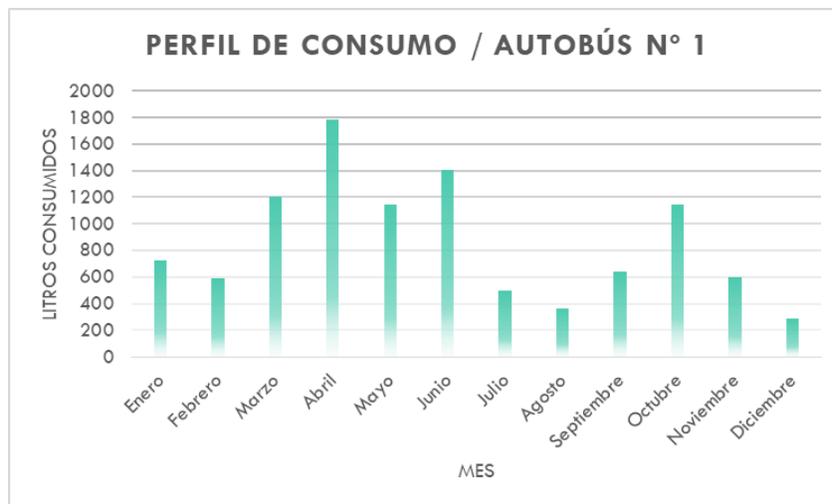


Figura 4.20: Perfil de consumo de combustible mensual del autobús nº 1 a lo largo del año 2018

Debido a este perfil de consumo, se opta por determinar un consumo medio anual (en litros / 100 km) para cada uno de los autobuses, obteniendo los siguientes valores:

Autobús 1:

- Consumo medio en el año 2018: 24,80 litros /100Km

Autobús 2:

- Consumo medio en el año 2018: 13,28 litros/100Km

Autobús 3:

- Consumo medio en el año 2018: 27,98 litros/100Km

Autobús 4:

- Consumo medio en el año 2018: 36,50 litros/100Km

Autobús 5:

- Consumo medio en el año 2018: 30,38 litros/100Km

Autobús 6:

- Consumo medio en el año 2018: 33,67 litros/100Km

Autobús 7:

- Consumo medio en el año 2018: 28,24 litros/100Km

Este consumo, en función de los kilómetros recorridos a lo largo del año, permite conocer de manera aproximada los litros consumidos por cada autobús en un año. Como precio del gasóleo de automoción se va a tomar el precio medio en España en el 2018. Obviamente, aunque se vaya a suponer este precio constante a lo largo de todo el ciclo de vida, no es una suposición que se adapte a la realidad. Sin embargo, la tendencia del precio de este combustible es a aumentar, por lo tanto se tendrá en cuenta en el apartado de conclusiones.

Este precio, al igual que el del GNC, se obtiene de la web del ministerio para la transición ecológica [46], determinando:

- Precio medio del gasóleo de automoción en España en 2018: 1,2315 € / litro
- Precio medio del GNC vehicular en España en 2018: 0,8875 € / kg

Para obtener este factor de conversión, no es suficiente con obtener la diferencia presentada en los estudios, ya que existe un gran número de cambios de unidades. Para realizar una equivalencia, se supone la densidad del gas natural mencionada en anteriores apartados, a 15°C y 200 bares, de 158,49 kg/m³. Transformando el consumo de GNC a litros / 100 km, es decir, las mismas unidades que con el diésel, obtenemos un factor de 1,5877. Esto significa que un modelo de autobús a GNC equivalente a su modelo diésel, consume un 58,77% más en volumen de combustible, lo cual era de esperar ya que el poder calorífico es inferior.

Aun así, el precio del combustible también es muy inferior, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Comparación del coste de combustible total de la flota y de cada autobús para el caso del GNC

COSTE DE COMBUSTIBLE						
	(km/año)	Consumo diésel (litros / 100 km)	Consumo GNC (litros / 100 km)	Consumo GNC (kg / 100 km)	Coste anual diésel (€ / año)	Coste anual GNC (€ / año)
Autobus 1	43.592	24,08	38,24	6,06	12.928	2.344
Autobus 2	51.355	13,28	21,09	3,34	8.401	1.523
Autobus 3	75.417	27,98	44,42	7,04	25.985	4.712
Autobus 4	63.561	36,50	57,96	9,19	28.574	5.182
Autobus 5	74.416	30,38	48,23	7,64	27.838	5.048
Autobus 6	81.116	33,67	53,45	8,47	33.630	6.099
Autobus 7	87.667	28,24	44,84	7,11	30.490	5.529
Total flota (16 años)					2.685.543	487.006

Como se puede observar, pese a que los costes de adquisición y mantenimiento son superiores, el coste de combustible presenta una enorme diferencia a favor de la opción de gas natural vehicular.

Los costes finales del ciclo de vida resultan, para toda la flota:

Para la opción de los siete autobuses diésel, el coste total que suponen hasta que transcurren los 16 años de servicio es de 5.081.552 €

Para la opción de los siete autobuses de gas natural, el coste total que suponen hasta que transcurren los 16 años de servicio es de 3.444.602 €

Claramente, la diferencia es abismal. Al finalizar la vida útil de esta flota de autobuses, el ahorro que se puede obtener mediante la renovación con modelos impulsados por gas natural es de aproximadamente 1,5 millones de euros. Pero como ya se ha mencionado, el coste de adquisición es mayor para este tipo de autobuses.

¿Cuánto tiempo ha de pasar para que los de gas natural comiencen a ser más rentables que los diésel? Se puede observar a continuación la curva de coste acumulado a lo largo de los 16 años:



Comparación del acumulado del LCC entre flota diésel y GNC

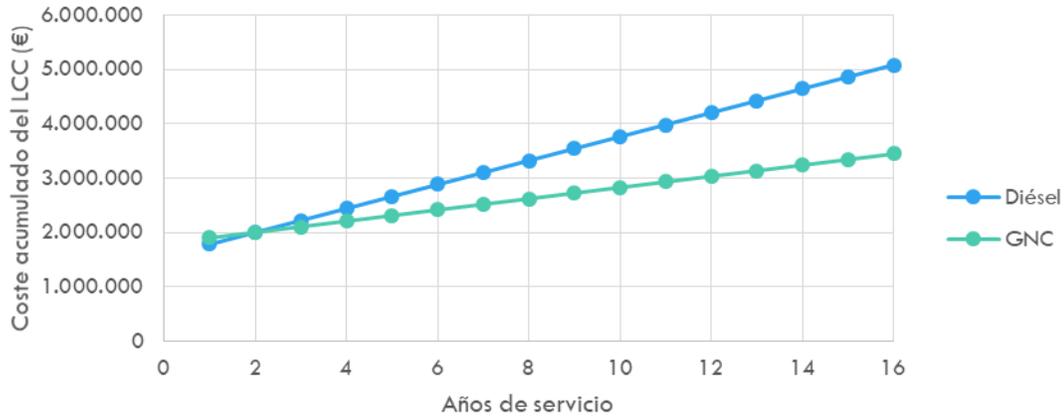


Figura 4.21: Curvas de coste acumulado del LCC para ambas flotas, GNC y diésel, a lo largo de los 16 años de servicio.

Como se puede observar, entre los 2 y 3 años de servicio, comienza a ser más rentable la opción de gas natural comprimido. El bajo coste de combustible es una pieza fundamental en esta conclusión, ya que supone una diferencia muy importante año tras año.

4.4.2. Pila de Combustible: Hidrógeno

Para la realización de esta comparación, se han tomado datos de principalmente tres estudios, [40], [47] y [48].

El factor de conversión para los costes de adquisición obtenido es de 2,8838, es decir, el equivalente de pila de combustible hidrógeno es un 188,28% más caro que el modelo diésel. Se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Comparación del coste de adquisición total de la flota y de cada autobús para el caso del HFCB

COSTE DE ADQUISICIÓN		
	Diésel	HFCB
Autobus 1	130.000	374.892
Autobus 2	90.000	259.541
Autobus 3	238.120	686.687
Autobus 4	301.356	869.046
Autobus 5	256.500	739.691
Autobus 6	252.000	726.714
Autobus 7	293.000	844.949
Total	1.560.976	4.501.519

En el caso del mantenimiento, sucede algo similar que con en el apartado anterior. En este caso, el mantenimiento es incluso menor con el GNC, teniendo un factor de conversión de 1,1333.

Tabla 4.5: Comparación de los costes de mantenimiento entre el modelo diésel y el HFCB, para toda la flota y para cada autobús

COSTE DE MANTENIMIENTO			
Nº plazas	> 55	26 - 38	< 25
Coste diesel (€/km)	0,1160	0,0867	0,0794
Coste GNC (€/km)	0,1315	0,0983	0,0900

	(km/año)	Mantenimient	
		Mantenimiento diésel (€/año)	Mantenimiento o HFCB (€/año)
Autobus 1	43.592	3.779	4.283
Autobus 2	51.355	4.621	4.621
Autobus 3	75.417	8.748	9.915
Autobus 4	63.561	7.373	8.356
Autobus 5	74.416	8.632	9.783
Autobus 6	81.116	9.409	10.664
Autobus 7	87.667	10.169	11.525
Total (16 años)		843.732	946.370

Para el caso del combustible, se toman valores de precios presentados por FCH Europa [48], considerando un precio de hidrógeno de 5 €/kg. Se obtiene la tabla siguiente:



Tabla 4.6: Comparativa del coste de combustible para toda la flota y para cada autobús, entre modelo diésel y su análogo HFCB

COSTE DE COMBUSTIBLE					
	(km/año)	Consumo diésel (litros / 100 km)	Consumo HFCB (kg / 100 km)	Coste anual diésel (€ / año)	Coste anual HFCB (€ / año)
Autobus 1	43.592	24,08	4,23	12.928	9.221
Autobus 2	51.355	13,28	2,33	8.401	5.992
Autobus 3	75.417	27,98	4,92	25.985	18.534
Autobus 4	63.561	36,50	6,41	28.574	20.380
Autobus 5	74.416	30,38	5,34	27.838	19.856
Autobus 6	81.116	33,67	5,91	33.630	23.987
Autobus 7	87.667	28,24	4,96	30.490	21.747

Como se puede observar, pese a que el coste de adquisición es superior a los modelos diésel, los costes de combustible son inferiores. ¿Llega a resultar rentable? A continuación se detalla el perfil del coste acumulado a lo largo de los años de servicio de la flota de autobuses.

Comparación del acumulado del LCC entre flota diésel y HFCB

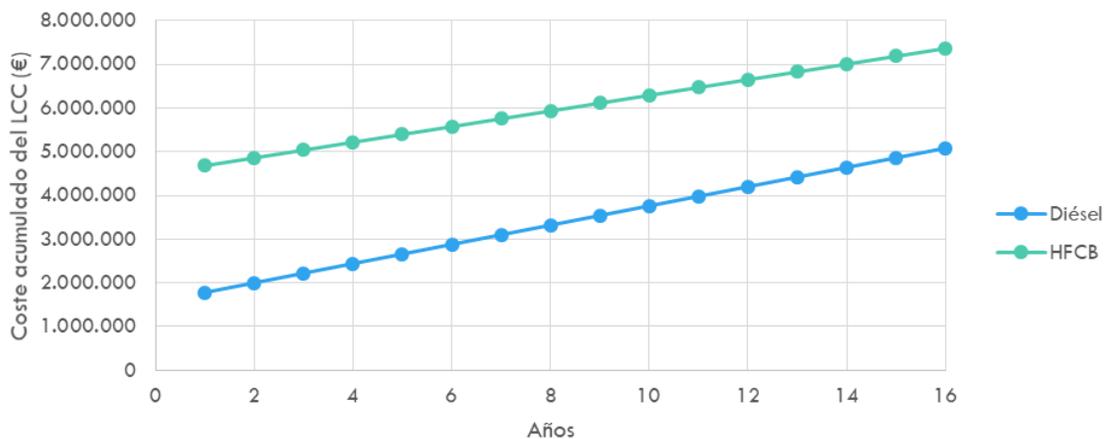


Figura 4.22: Comparación del coste acumulado del ciclo de vida de la flota de autobuses a lo largo de los 16 años de servicio, para las opciones diésel y HFCB

Por lo tanto, no es una solución que llegue a ser rentable para 16 años de vida útil del vehículo. Se ha de tener en cuenta que la tendencia de la curva HFCB es a unirse en algún punto con la curva correspondiente a la opción diésel, igualando así su coste. Pero esto no ocurre dentro de los años de vida que tienen estos autobuses, con lo cual la opción de la pila de combustible de hidrógeno, actualmente, no es rentable.



4.4.3. Impulsión eléctrica

Para esta comparativa se van a tener en cuenta tres estudios, [34], [41] y [47].

Para el coste de adquisición, se va a tomar un factor de corrección de 2,8125, en el que se incluye tanto el coste del vehículo como el coste inicial de la batería. Los recambios que se pudiesen hacer no se tienen en cuenta en ninguno de los costes (adquisición, mantenimiento y combustible). Se añaden al finalizar el apartado.

Se obtiene una tabla comparativa de costes de adquisición:

Tabla 4.7: Comparativa de los costes de adquisición de la flota y para cada autobús entre la versión diésel y la eléctrica

COSTE DE ADQUISICIÓN		
	Diésel	Eléctrico
Autobus 1	130.000	365.625
Autobus 2	90.000	253.125
Autobus 3	238.120	669.713
Autobus 4	301.356	847.564
Autobus 5	256.500	721.406
Autobus 6	252.000	708.750
Autobus 7	293.000	824.063
Total	1.560.976	4.390.245

Para el coste de mantenimiento se va a suponer un factor de conversión de 0,5263, es decir, el mantenimiento del autobús eléctrico es un 47,37% más barato del coste de mantenimiento del diésel.



Tabla 4.8: Comparativa de los costes de mantenimiento para la flota y para cada autobús, entre las versiones diésel y eléctrica

Nº plazas	COSTE DE MANTENIMIENTO		
	> 55	26 - 38	< 25
Coste diésel (€/km)	0,1160	0,0867	0,0794
Coste eléctrico (€/km)	0,0611	0,0456	0,0418

	Distancia	Mantenimiento	Mantenimiento eléctrico
	recorrida (km/año)	diésel (€/año)	(€/año)
Autobus 1	43.592	3.779	1.989
Autobus 2	51.355	4.078	2.146
Autobus 3	75.417	8.748	4.604
Autobus 4	63.561	7.373	3.881
Autobus 5	74.416	8.632	4.543
Autobus 6	81.116	9.409	4.952
Autobus 7	87.667	10.169	5.352
Total (16 años)		835.033	439.491

Para el coste de combustible se transforman los litros de diésel en kWh, suponiendo el poder calorífico indicado previamente, de 43 MJ / kg, y una densidad de 0,832 kg / litro.

$$1 \text{ litro} = 0,832 \text{ kg}$$

$$0,832 \text{ kg} * 43 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 35,776 \text{ MJ}$$

$$35,776 \text{ MJ} = 9,94 \text{ kWh}$$

El consumo del modelo diésel se mide en litros / 100 km, al transformar esos litros en kWh se obtiene el equivalente en kWh del consumo del motor diésel. La cuestión es que esta energía consumida es superior a la que realmente se necesita para mover el autobús, ya que al ser un motor de combustión interna tiene un rendimiento máximo del 35%.

La energía que consume el motor eléctrico equivaldrá al 35,7% de dicha energía consumida, suponiendo el rendimiento del motor eléctrico del 98%.

Por ejemplo:

El autobús nº 1 tiene un consumo medio de 24,08 litros / 100 km. Eso equivale a 20,03 kg / 100 km, que transformados a unidad de energía resultan en 239.3 kWh / 100 km. El 35,7 % de dicho consumo es de 85,43 kWh / 100 km, que es aproximadamente lo que consumiría el motor eléctrico para mover el mismo autobús.

Un autobús eléctrico tiene un peso superior a uno diésel, principalmente debido a la adición de las baterías, por lo tanto el consumo bruto de energía destinada al movimiento del autobús



no es el mismo. Sin embargo, estos autobuses constan de freno regenerativo, es decir, generan electricidad que se introduce nuevamente en las baterías. El resultado es que, pese a que el consumo bruto de energía no es igual, el consumo neto si resulta muy similar.

Para establecer el precio de la electricidad, se tendrá en cuenta una tarifa con discriminación horaria de 3 periodos, punta, valle y supervalle. Se tomaran precios medios de electricidad en el año 2018 para cada uno de los periodos, obteniendo:

- Periodo punta: 0,145 €/kWh
- Periodo valle: 0,080 €/kWh
- Periodo supervalle: 0,065 €/kWh

Debido a la rutina de la empresa, con alta probabilidad se cargarían los autobuses durante la noche. Para tratar de ajustarse a la realidad, se propone que el 70% de la carga se realice en periodo de supervalle, que el 20% se realice en periodo de valle, y que el 10% restante se realice en periodo de punta. Así, se obtiene un precio medio de la electricidad de 0,076 €/kWh.

Teniendo todo esto en cuenta, se procede a realizar la tabla comparativa:

Tabla 4.9: Comparativa de coste de combustible para toda la flota y para cada autobús, entre el modelo diésel y eléctrico

COSTE DE COMBUSTIBLE						
	Distancia recorrida (km/año)	Consumo diésel (litros / 100 km)	Consumo diésel (kWh / 100 km)	Consumo eléctrico (kWh / 100 km)	Coste anual diésel (€ / año)	Coste anual eléctrico (€ / año)
Autobus 1	43.592,00	24,08	239,52	82,16	12.928,49	2.721,81
Autobus 2	51.355,00	13,28	132,11	45,31	8.400,74	1.768,59
Autobus 3	75.417,00	27,98	278,27	95,45	25.985,50	5.470,68
Autobus 4	63.561,00	36,50	363,06	124,53	28.573,61	6.015,54
Autobus 5	74.416,00	30,38	302,11	103,62	27.837,76	5.860,63
Autobus 6	81.116,00	33,67	334,83	114,85	33.630,25	7.080,11
Autobus 7	87.667,00	28,24	280,88	96,34	30.490,08	6.419,02
Total flota (16 años)					2.685.542,82	565.381,97

Como se puede observar, los costes de mantenimiento y de combustible son bastante inferiores respecto a su equivalente en diésel, pero es necesario añadir un coste adicional, y es el recambio de las baterías. Se estima que estas baterías tienen una vida útil de 10 años, con lo cual para los años de servicio de estos autobuses sólo sería necesario un recambio para cada autobús.

El precio mundial promedio del kWh de capacidad de las baterías en 2018 fue de 176 \$/kWh [49]. En el caso de este estudio, se tiene dos autobuses con una autonomía de 650 km, y otros cinco autobuses con una autonomía que ronda los 1.600 km. Esto se traduce a dos baterías de aproximadamente 330 kWh, y cinco baterías de 660 kWh.



Aun así, no conviene descargar las baterías totalmente, con lo cual esta autonomía se verá reducida con alta probabilidad.

Por lo tanto, haciendo un cambio de moneda, el precio del kilovatio hora de capacidad se queda en 159 €/kWh. Se supone que el recambio de las baterías se realiza en el año 8, para aprovechar al máximo la vida útil de estas, aumentando el coste total en 629.640 €.

A continuación se incluye la gráfica final con la comparación de los costes acumulados del ciclo de vida completo:

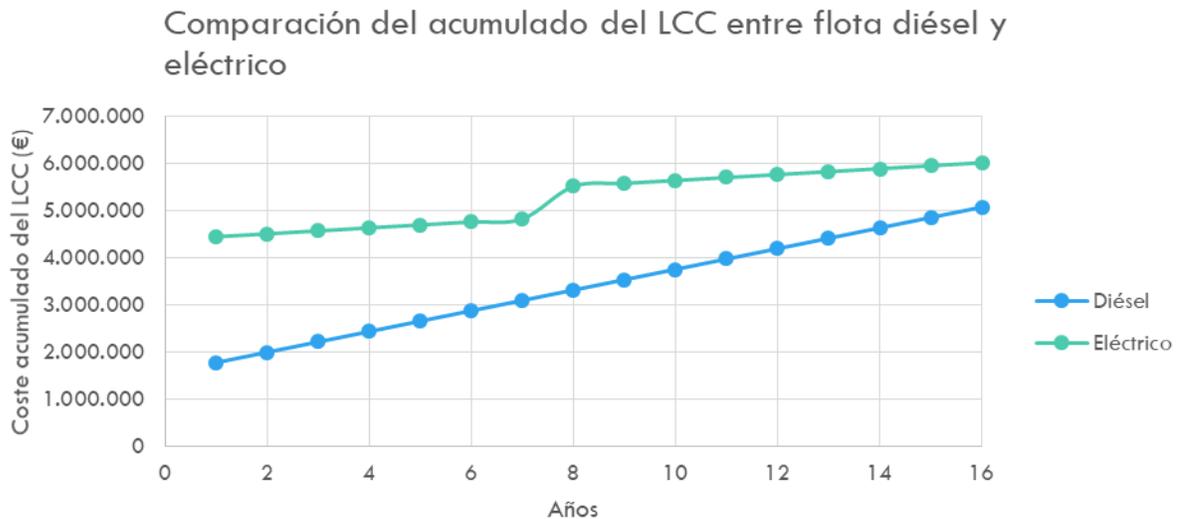


Figura 4.23: Comparación del coste acumulado del ciclo de vida de toda la flota para 16 años, entre la versión diésel y la eléctrica

Como se puede observar, pese a que no llega a ser rentable en comparación con la opción diésel, sí que tiene una tendencia muy clara a parecerse su coste al final del ciclo de vida. Esto es debido a los bajos costes de mantenimiento y de combustible. La pieza fundamental de la viabilidad de este tipo de tecnología es el precio de las baterías, ya que también se incluyen en el precio de adquisición, causando que aumente bastante.

Como se ha podido observar a lo largo de los años, el coste de las baterías no ha hecho más que descender, con lo cual no es una locura afirmar que este tipo de tecnología llegue a ser rentable por sí misma, sin depender de ayudas gubernamentales.



5. CONCLUSIONES

El sector transporte y almacenamiento en España es una pieza fundamental para llevar a cabo el objetivo que se ha propuesto la Unión Europea de reducción de emisiones. Aunque el transporte colectivo de viajeros no presenta un porcentaje muy elevado dentro de este sector en comparación a otras actividades, afecta directa e indirectamente a una gran cantidad de personas.

De entre las opciones barajadas como alternativas a los combustibles convencionales, en España se encuentran el GNC (gas natural comprimido), la pila de combustible de hidrógeno, y la impulsión eléctrica.

Desde un punto de vista medioambiental y de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y sulfuros, las mejores opciones son las dos últimas, pero con ciertas condiciones. La obtención de hidrógeno actualmente proviene, en su mayoría, del refinado de petróleo, y la electrolisis es un método no tan usado (apenas un 5%). La verdadera ventaja de esta tecnología se encuentra en que es posible realizar esa electrolisis mediante la utilización de una fuente energética renovable. Esto transforma el hidrógeno obtenido en un producto muy interesante, ya que permite paliar uno de los principales inconvenientes de los recursos renovables, y es la falta de capacidad de almacenamiento. Además, en este caso el hidrógeno como producto secundario, tiene un origen en su mayor parte renovable, con una consecuente reducción de emisiones.

En el caso de la electricidad, sucede algo parecido. Si el origen es renovable, o en su defecto, nuclear, la reducción de gases de efecto invernadero es importante. Sin embargo, esta situación no es real, ya que en España existe un mix energético que aúna diversas tecnologías. Además, actualmente el país no puede permitirse ser independiente de las denominadas centrales de base, por causas de estabilidad de la red y seguridad del suministro. Con lo cual no es viable hoy en día un mix energético 100% renovable.

Sin embargo, esto no quiere decir que estas dos tecnologías, en su situación actual, no beneficien la reducción de emisiones. En comparación con los combustibles hoy en día utilizados para la impulsión de vehículos, incluso teniendo en cuenta las formas de obtención de estos tipos de impulsión, se reducen las emisiones asociadas. Es cierto que, con una alta probabilidad, el desarrollo y abaratamiento de estas tecnologías en un futuro aumentará aún más su efecto beneficioso con el medio ambiente.

Desde un punto de vista de independencia energética del país, la mejor opción es, con diferencia, la eléctrica. Si bien España no es un país con una alta independencia energética, suple su demanda mediante la conexión francesa. Es decir, depende esencialmente de un país europeo. Con las otras dos tecnologías, la gran mayoría de las importaciones se realizan a



países que no pertenecen a la Unión Europea, algunos de ellos con una situación política y de seguridad de suministro bastante inestable. Los precios de estas importaciones también sufren cambios bruscos, y fluctuaciones poco medibles, ya que dependen de otros factores externos al simple intercambio económico.

Desde un punto de vista que asegure la viabilidad económica de estas tecnologías para las empresas dedicadas a este tipo de transporte, la opción más rentable es el gas natural comprimido. A diferencia de las otras dos opciones, a los dos o tres años de servicio, empieza a ser una opción más rentable que su homóloga convencional. Tanto la pila de combustible de hidrógeno como la eléctrica no llegan a ser rentables en la vida útil de un autobús, en comparación a los autobuses diésel. Esto no quiere decir que en un futuro alcancen la misma rentabilidad, pero este hecho puede estar promovido por dos vías. El precio del diésel tiene una tendencia alcista, más aún en los próximos años, ya que la Unión Europea tiene intención de vetar este combustible. Y mientras tanto, el desarrollo e investigación en las otras dos tecnologías tiende a abaratar sus costes. Por lo tanto, el momento en que se igualen las rentabilidades de todos estos métodos de impulsión estará promovido tanto por la subida de los precios del diésel, como por la bajada de los precios de estas tecnologías. Aun así, la opción eléctrica es la que más cerca se encuentra de llegar a ese punto.

Actualmente, puede llegar a ser una opción viable teniendo en cuenta las ayudas que se proponen desde el gobierno. La pila de combustible de hidrógeno, sin embargo, actualmente es inviable para las pequeñas empresas, ya que su coste de adquisición es excesivamente elevado.

Los costes que se han tenido en cuenta en el ejemplo práctico, adquisición, mantenimiento y combustible, son muy representativos del estado de estas tecnologías. Constituyen una parte muy importante del coste final, con lo cual es previsible que si ninguno de ellos varía en los próximos años, la viabilidad económica se mantenga similar.



6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Debido a la escasez de datos e información actualmente disponible de dominio público, los resultados obtenidos en este estudio son meramente orientativos. Se han basado en estimaciones de hace cuatro o cinco años de diversos autores, con lo cual al ritmo de desarrollo actual de las nuevas tecnologías, es de suponer que los valores aquí indicados tiendan a escenarios pesimistas.

La decisión final al escoger una alternativa para sustituir autobuses individuales, o incluso una flota entera, debe tomarse teniendo en cuenta aspectos que no se recogen en este estudio. Uno de los más importantes es el coste de infraestructura. Pese a que en este análisis se ha supuesto suministro externo debido a la falta de información, en el caso de disponer de ella se debería realizar un estudio de los costes que conllevaría esa instalación, y cómo afectaría ello al precio final del combustible / electricidad.

La viabilidad de estas tecnologías está fuertemente ligada a los precios que haya establecido la empresa interesada, y al margen de beneficios que espera conseguir. Por lo tanto, se deberían tener en cuenta aspectos como el tiempo de amortización de esta sustitución, y valorar su rentabilidad.

Existen actualmente deducciones fiscales e incentivos nacionales y regionales para fomentar el uso de estas tecnologías. En función de la localización de la empresa y la flota, se debería tener en cuenta la reducción de costes que pudiese haber, y tener en cuenta también durante cuantos años se va a mantener esa reducción.

Se consideraría muy útil el diseño de un modelo de simulación de costes, al margen del facilitado por el gobierno, que lamentablemente solo permite la simulación con modelos diésel. Una de las variables que se considera muy importante, a raíz de la realización de este estudio, es un mapa de nodos de la red eléctrica que permitan el enganche de una estación de carga eléctrica para autobuses. Al margen del coste económico que pudiese conllevar, es necesario contar con la viabilidad técnica, y una demanda de tal magnitud (sobre todo si se habla de una flota completa de autobuses eléctricos) no es soportable en cualquier punto de la red. De igual manera, escasea la información acerca de estaciones de carga privadas, tanto de gas natural como de hidrógeno, acerca de viabilidad técnica, costes, tipo de obra, infraestructura que conlleva, etc.

7. ANEXOS

7.1. Datos numéricos de (40)

Table 4. Summary of the LCC model key input parameters (all currency values expressed in Australian Dollars).

Phase	Parameter	Unit	Value	Ref.
Bus acquisition	Diesel	\$	498,722	Bowers et al. (2015)
	Hybrid	\$	599,485	Bowers et al. (2015)
	CNG	\$	585,640	Bowers et al. (2015)
	HFCB	\$	1,315,789	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	\$	789,474	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
Maintenance	Diesel	\$/km	0.27	Bowers et al. (2015)
	Hybrid	\$/km	0.50	Bowers et al. (2015)
	CNG	\$/km	0.34	Bowers et al. (2015)
	HFCB	\$/km	0.99	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	\$/km	0.53	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
Fuel consumption	Diesel	L/100 km	65.0	Bowers et al. (2015)
	Hybrid	L/100 km	49.4	Bowers et al. (2015)
	CNG	L/100 km	103.2	Bowers et al. (2015)
	HFCB	kg/100 km	10.0	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	kg/100 km	10.0	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
AdBlue consumption	Diesel	L/100 km	2.215	Bowers et al. (2015)
	Hybrid	L/100 km	1.441	Bowers et al. (2015)
	CNG	–	–	Bowers et al. (2015)
	HFCB	–	–	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	–	–	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
Fuel prices	Diesel	\$/L	1.3882	Bowers et al. (2015)
	AdBlue	\$/L	0.95	Bowers et al. (2015)
	CNG	\$/L	1.5127	Bowers et al. (2015)
	HFCB	\$/kg	20.90	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	\$/kg	11.80	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
End of life	Diesel	\$	102,682	Bowers et al. (2015)
	Hybrid	\$	123,429	Bowers et al. (2015)
	CNG	\$	120,541	Bowers et al. (2015)
	HFCB	\$	0	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)
	HFCB*	\$	0	Spendelow and Papageorgopoulos (2012)

8. BIBLIOGRAFÍA

1. **Instituto Nacional de Estadística.** INE Base. *Clasificación Nacional de Actividades Económicas CNAE.* [En línea] 2019. http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177032&menu=ultiDatos&idp=1254735976614.
2. **Aula Senior, Universidad de Murcia.** Tema 3. La medición de la actividad económica. [En línea] 2013. https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/aulademayores/economia_t3__aulasenor-2013_.pdf.
3. **Instituto Nacional de Estadística.** INE Base. *Contabilidad Nacional Anual de España.* [En línea] 2019. <https://ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=29008&L=0>.
4. *La evolución del precio del petróleo durante la Gran Recesión.* **Picatoste, José y Garzón Gordón, Antonio José.** [ed.] Universidad de Castilla-La Mancha. Toledo : s.n., 2017. XXIV Encuentro de Economía Pública.
5. **Centro Nacional de Logística y EVERIS Spain.** Estudio de caracterización del sector del transporte y la logística en España. *CEOE, Confederación Española de Organizaciones Empresariales.* [En línea] 2016. https://contenidos.ceoe.es/CEOE/var/pool/pdf/cms_content_documents-file-499-estudio-de-caracterizacion-del-sector-del-transporte-y-la-logistica-en-espana-resumen-ejecutivo-y-conclusiones.pdf.
6. **Instituto Nacional de Estadística.** INE Base. *Encuesta de Población Activa.* [En línea] 2019. http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176918&menu=resultados&secc=1254736195129&idp=1254735976595.
7. **Observatorio del Transporte y la Logística en España, Ministerio de Fomento.** *Informe Anual 2018.* 2019.
8. **Asociación de Empresas de Energías Renovables.** *Estudio del Impacto Macroeconómico de las Energías Renovables en España.* 2017.
9. **Eurostat.** Eurostat Database. *Final Energy Consumption by Sector.* [En línea] 2019. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/ten00124>.
10. **Monzón, Andrés, Pérez, Pedro y Di Ciommo, Floridea.** *La eficiencia energética y ambiental de los modos de transporte en España.* Universidad Politécnica de Madrid. 2009.
11. **Observatorio Boliviano de Cambio Climático y Desarrollo.** OBCCD. *Gases de efecto invernadero.* [En línea] <https://obccd.org/informacion-basica-2/gases-de-efecto-invernadero-co2e-co2-y-carbono/>.

12. **Ministerio para la Transición Ecológica.** *Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera, Informe Resumen Edición 2019.* 2019.
13. **Instituto Nacional de Estadística.** INE Base. *Estadística de Transporte de Viajeros.* [En línea] 2019. <https://ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=20239>.
14. **GASNAM.** GASNAM. *¿Cuál es la diferencia entre el GNL y GNC, y qué uso se le da a cada uno de ellos?* [En línea] 2018. <https://gasnam.es/cual-es-la-diferencia-entre-el-gnl-y-gnc-y-que-uso-se-le-da-cada-uno-de-ellos/>.
15. **Energía y Sociedad.** Energía y Sociedad, las claves del sector energético. *El gas natural en España.* [En línea] 2018. <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-2-demanda-del-gas-natural/>.
16. **Fresnedo Moreno, Víctor.** Trabajo Fin de Estudios. *Mejoras de eficiencia y optimización de equipos en una central de ciclo combinado C.T.C.C. Gas Natural Fenosa (Cartagena).* 2016.
17. **Enagas.** *Informe del sistema gasista español.* 2018.
18. **Preciogas.** Preciogas. *¿Para qué se utiliza el Gas Natural?* [En línea] 2019. <https://preciogas.com/faq/usos-gas-natural>.
19. **Gas Extremadura.** El Gas Natural. *Características principales de los gases combustibles.* [En línea] 2018. <https://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/caracteristicas-principales-de-los-gases-combustibles>.
20. **Ingeniería Analítica, Chromatography and Spectrometry.** Servicios Analíticos Avanzados. *Poder Calorífico, Densidad del Gas e Índice de Wobbe.* 2015.
21. **GASNAM.** Tablas. *Tabla de equivalencias Gasnam-Sedigas.* [En línea] 2016. <http://www.gasnam.es/wp-content/uploads/2018/01/2016.01.21-Tabla-GASNAM-SEDIGAS-b.pdf>.
22. **Grupo Naturgy.** Nedgia. *Características del Gas Natural.* [En línea] 2019. <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>.
23. **Mans Teixidó, Claudi.** Investigación Y Ciencia. *¿Qué es lo que mueve a los autobuses de Barcelona?* [En línea] 2018. <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/24/posts/qu-es-lo-que-mueve-a-los-autobuses-de-barcelona-16445>.
24. **The Observatory of Economic Complexity.** oec.world. *Natural Gas y gaseous state.* [En línea] 2017. <https://oec.world/en/profile/hs92/271121/>.
25. —. oec.world. *Where does Spain import Natural gas in gaseous state from? (2017).* [En línea] 2018. https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/import/esp/show/271121/2017/.
26. **LennTech.** Tratamiento y purificación de agua, Tabla periódica. *Hidrógeno.* [En línea] 2019. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>.

27. **Innovación y Desarrollo Tecnológico.** Artículo de revista digital. *Purificación de H₂ Obtenido del Reformado de Hidrocarburos Mediante Prox-Co, Usando catalizadores de Au/Ceo₂.* 2015.
28. **Escuela técnica superior de ingenieros, Universidad de Sevilla.** *Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica: el caso de la producción de hidrógeno.* Sevilla : s.n., 2009.
29. **G. Fierro, José Luis.** Lychnos Edición Digital. *El hidrógeno: Metodologías de producción.* [En línea] 2011.
http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion.
30. **Bueno Oliveros, José Antonio.** Documento de trabajo. *Las alternativas al petróleo como combustible para vehículos automóviles.* 2007.
31. **The Observatory of Economic Complexity.** oec.world. *Hydrogen.* [En línea] 2017.
<https://oec.world/en/profile/hs92/2804/>.
32. —. oec.world. *Where does Spain export Hydrogen to?* . [En línea] 2017.
https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/export/esp/show/2804/2017/.
33. —. oec.world. *Where does Spain import Hydrogen from?* [En línea] 2017.
https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/import/esp/show/2804/2017/.
34. **Endesa .** Endesa Vehículo Eléctrico. *Europa pisa el acelerador con el coche eléctrico.* [En línea] 2017. <https://endesavehiculoelectrico.com/europa-pisa-el-acelerador-con-el-coche-electrico/>.
35. **Delzo Melendez, Juan Pablo.** Proyecto de especialidad. *Procesos de recarga de autobuses eléctricos y viabilidad de funcionamiento en una red de transporte urbano de superficie.* 2014.
36. **Álvarez, Raúl.** Xataka Noticias. *Este autobús eléctrico tiene una autonomía de 563 kilómetros por carga y circulará en 2017.* [En línea] 2016.
<https://www.xataka.com/vehiculos/este-autobus-electrico-tiene-una-autonomia-de-563-kilometros-por-carga-y-circulara-en-2017>.
37. **Red Eléctrica de España.** *Informe Anual del Sistema Eléctrico Español 2018.* 2018.
38. **Ayuntamiento de Madrid.** Plan. *Plan de Movilidad Urbana Sostenible de la ciudad de Madrid.* 2014.
39. **Dirección General de Tráfico.** Estadísticas e Indicadores. *Parque de vehículos.* [En línea] 2018. <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/>.
40. **Ally, J. y Pryor, T.** Trabajo de investigación. *Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuell cell bus systems: An Australian case study.* 2016.
41. **de Sá Riechi, Jorge Luiz.** Tesis doctoral. *Desarrollo de un modelo para la optimización del reemplazo de vehículos para una flota de transporte urbano de pasajeros.* Valencia : s.n., 2018.



42. **Lajunen, Antti y Lipman, Timothy.** Artículo en Revista Elsevier. *Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses.* [Digital]. 2016.
43. **Mišanović, Slobodan, Vasić, Miloš y Staŕojević, Nada.** Maintenance Forum 2018. *MAINTENANCE OF ELECTRIC CITY BUSES – COST.* 2018.
44. **AENOR.** UNE-EN 60300-3-3. *Gestión de la confiabilidad.* 2009.
45. **Ministerio de Fomento.** Observatorio de costes del transporte de viajeros en autocar. s.l. : Secretaria General de Transportes, 2005. 2.
46. **Gobierno de España.** Ministerio para la Transición Ecológica. *Precios de carburantes.* [En línea] 2019. <https://energia.gob.es/es-es/Servicios/Paginas/consultasdecarburantes.aspx>.
47. *Tradig off cost, environmental impact, and levels of service in the optimal design of transit bus fleets.* **Durango-Cohen, Pablo L. y McKenzie, Elaine C.** Evanston, Illinois, USA : Elsevier, 2017.
48. **Element Energy Limited.** *Strategies for joint procurement of fuel cell buses.* s.l. : FCH, 2018. 978-92-9246-325-0.
49. **José A. Roca.** El periodico de la energía. *Los precios de las baterías caen hasta un mínimo histórico de 176 \$/kWh en 2018.* [En línea] 2018. <https://elperiodicodelaenergia.com/los-precios-de-las-baterias-caen-hasta-un-minimo-historico-de-176-dolares-kwh-en-2018/>.