



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

*Estudio teórico de la aplicación de Gases  
Licuados de Petróleo (GLP) en unidades de  
potencia de vehículos híbridos para  
transporte público*

---

**MEMORIA PRESENTADA POR:**

***Gonzalo Sáenz Ojeda***

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Convocatoria de defensa: Junio de 2017**



## Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio teórico para conocer la viabilidad que tiene un autobús híbrido que utilice la energía eléctrica y el GLP como fuentes de energía. Se explican las razones ambientales por las que ha sido seleccionado este tipo de vehículo, así como las posibles mejoras que puede tener su implantación. Los objetivos fijados para el trabajo son el cálculo de consumo de combustible y de emisiones, la viabilidad económica y la viabilidad técnica. Para el estudio se seleccionan tres modelos: un autobús convencional que utiliza gasóleo como combustible, un autobús híbrido con energía eléctrica y gasóleo, y por último el modelo propuesto con energía eléctrica y GLP. Se realizan los cálculos pertinentes para llegar a los objetivos propuestos y, una vez alcanzados se analizan para obtener las conclusiones y la posible viabilidad del modelo propuesto.

**Palabras clave:** GLP, motor térmico, motor híbrido, transporte público, contaminantes.



## Abstract

Within this project, a theoretical study was conducted to investigate the viability of a hybrid bus which uses electrical energy and LPG as power sources. The environmental reasons for this particular vehicle being selected have been explained within the project, as well as the possible improvements that can have its implantation. The set objectives for the project are the computation of the fuel consumption and pollutant emissions, economic and the technical viability. Three patterns are selected: a conventional bus which uses diesel oil as fuel, a hybrid bus with electric power and diesel oil, and finally the proposed pattern with electric power and LPG. The appropriate and relevant calculations were performed to reach the set objectives and, once they are reached, they are analyzed to obtain conclusions about the possible viability of the purposed pattern.

**Keywords:** LPG, heat engine, hybrid engine, public transport, pollutants.



## Índice de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Inconvenientes del uso de combustibles fósiles.....	3
1.1.1.	Contaminación.....	3
1.1.2.	Energía no renovable .....	11
1.2.	Medidas.....	12
1.2.1.	Uso de la energía eléctrica .....	13
1.2.2.	Uso de combustibles alternativos .....	20
1.2.3.	Transporte público.....	23
1.3.	Evolución del mercado .....	23
1.3.1.	Trolebús .....	23
1.3.2.	Mercedes OE302.....	24
1.3.3.	Irizar i2e.....	24
1.3.4.	Tempus Autogas .....	25
1.4.	Conclusiones.....	25
2.	Objetivos.....	27
2.1.	Objetivo principal: Estudio de viabilidad de uso de GLP como combustible para motores híbridos de transporte urbano.....	28
2.2.	Objetivos específicos .....	28
2.2.1.	Cálculo del consumo de combustible.....	28
2.2.2.	Cálculo de emisiones.....	28
2.2.3.	Viabilidad económica.....	28
2.2.4.	Viabilidad técnica.....	29
3.	Desarrollo .....	30
3.1.	Autobuses .....	31
3.1.1.	Autobús diésel.....	31
3.1.2.	Autobús híbrido diésel .....	34

3.1.3.	Autobús híbrido GLP .....	36
3.2.	Consumo de combustible .....	47
3.2.1.	Vida útil.....	48
3.2.2.	Tiempo de funcionamiento.....	49
3.2.3.	Potencia media.....	49
3.2.4.	Consumo total del combustible a lo largo de la vida útil.....	50
3.3.	Emisiones.....	52
3.3.1.	Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).....	57
3.3.2.	Compuestos orgánicos volátiles a excepción del metano (COVNM).....	57
3.3.3.	Monóxido de carbono (CO).....	58
3.3.4.	Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).....	58
3.3.5.	Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).....	59
3.3.6.	Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).....	59
3.3.7.	Partículas en suspensión.....	59
3.3.8.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.....	59
3.3.9.	Análisis de las emisiones.....	60
3.4.	Viabilidad económica.....	60
3.4.1.	Precio del autobús.....	60
3.4.2.	Precio del combustible.....	62
3.4.3.	Precio total .....	63
4.	Conclusiones .....	65
5.	Bibliografía.....	67

## Índice de figuras

Figura 1: Media anual de dióxido de nitrógeno en microgramos por m <sup>3</sup> (µg/ m <sup>3</sup> ).....	4
Figura 2: Clasificación de diferentes puntos del mundo según su calidad del aire .....	8
Figura 3: Esquema de funcionamiento de vehículo eléctrico.....	14
Figura 4: Puntos de carga para vehículos eléctricos a lo largo de la Península Ibérica.....	15
Figura 5: Esquema de funcionamiento de vehículo híbrido.....	17
Figura 6: Esquema de funcionamiento de vehículo híbrido enchufable.....	18
Figura 7: Puntos de suministro de GLP para vehículos en España.....	22
Figura 8: Trolebús chileno en 1989.....	23
Figura 9: Mercedes OE302 .....	24
Figura 10: Irizar i2e.....	24
Figura 11: Tempus Autogas.....	25
Figura 12: Dibujo del Lion`s City .....	32
Figura 13: Dibujo del Lion`s City Hybrid .....	34
Figura 14: Depósito toroidal .....	39
Figura 15: Depósito cilíndrico.....	39
Figura 16: Boca de carga.....	40
Figura 17: Tubería GLP .....	40
Figura 18: Electroválvula de corte.....	41
Figura 19: Válvula antiretorno .....	41
Figura 20: Válvula de sobrepresión.....	42
Figura 21: Flotador .....	43
Figura 22: Multiválvula.....	43
Figura 23: Sensor de temperatura .....	44
Figura 24: Caja estanca para depósito cilíndrico.....	44
Figura 25: Reductor-vaporizador .....	45
Figura 26: Inyectores para GLP .....	45
Figura 27: Bujía para GLP .....	46
Figura 28: Centralita .....	46
Figura 29: Conmutador .....	47

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Coches, camiones y autobuses registrados a nivel mundial .....	2
Gráfico 2: Distribución de las emisiones de dióxido de carbono de 1980 a 1999 .....	6
Gráfico 3: Anomalías anuales de temperatura en la Tierra (°C) .....	9
Gráfico 4: Producción global de petróleo crudo.....	11
Gráfico 5: Evolución del uso del GLP en Europa .....	21
Gráfico 6: Potencia suministrada por diferentes modelos del D0836 .....	33
Gráfico 7: Par suministrado por diferentes modelos del D0836.....	34
Gráfico 8: Potencia suministrada por diferentes modelos del E0836.....	38
Gráfico 9: Par suministrado por diferentes modelos del E0836.....	38
Gráfico 10: Ahorro de combustible con disposición híbrida.....	51

## Índice de tablas

Tabla 1: Población europea expuesta a la contaminación .....	3
Tabla 2: Escala de calidad del aire definida por "Environmental Protection Agency" .....	7
Tabla 3: Energía eléctrica producida a partir de combustibles fósiles .....	13
Tabla 4: Características técnicas del Lion's City .....	32
Tabla 5: Características técnicas de modelos del D0836.....	33
Tabla 6: Características técnicas del Lion's City Hybrid .....	35
Tabla 7: Características técnicas de modelos del E0836.....	37
Tabla 8: Factores de emisión 1 .....	54
Tabla 9: Factores de emisión 2.....	55
Tabla 10: Masa total de contaminantes emitidos 1 .....	55
Tabla 11: Masa total de contaminantes emitidos 2 .....	56
Tabla 12: Emisiones de contaminantes normalizadas 1.....	56
Tabla 13: Emisiones de contaminantes normalizadas 2.....	56
Tabla 14: Desglose del precio de los autobuses.....	64

# **1. Introducción**

Desde el descubrimiento del carbón como fuente de energía para la propulsión de máquinas y las consecuentes revoluciones industriales que de esta derivaron, el ser humano ha utilizado los hidrocarburos como principal fuente de energía, ya sea para la obtención de calor o la propulsión de motores para la transformación de esta en energía eléctrica, el transporte o agricultura entre otros usos. Uno de sus múltiples usos es el de la alimentación de motores para la propulsión de vehículos. El desarrollo de este tipo de motores ha sido uno de los mayores logros de la tecnología moderna, ya que estos satisfacen la mayor parte de las necesidades de transporte en la sociedad actual.

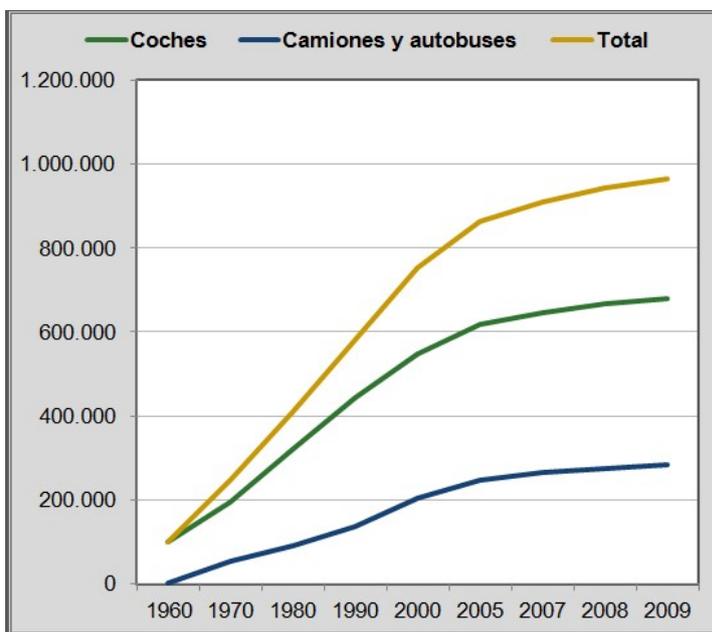


Gráfico 1: Coches, camiones y autobuses registrados a nivel mundial

Hoy en día, la cantidad de vehículos recorriendo las ciudades y carreteras de todo el mundo se cuenta por millones, ya sean turismos, furgonetas, camiones, autobuses, tranvías, etc. La gran mayoría de estos vehículos actualmente están propulsados por motores de combustión interna alternativos (MCIA), los cuales aprovechan la energía química almacenada en diferentes combustibles, dependiendo de los requerimientos de cada motor, para impulsar el vehículo. Esta

liberación de energía se realiza mediante la combustión, una reacción química entre un combustible y un comburente (oxígeno).

Este tipo de motores, están impulsados mayoritariamente por combustibles de origen fósil. Dentro de los combustibles fósiles se agrupan el carbón, el petróleo y el gas natural, formados naturalmente mediante procesos biogeoquímicos desarrollados bajo condiciones especiales a lo largo de millones de años. Estos materiales usualmente se someten a diferentes procesos como pueden ser destilación, para separar los diferentes componentes que estos contienen, y más tarde a craqueo, reformado catalítico, isomerización, hidrodesulfuración, etc. para separar sus compuestos y tener los combustibles adecuados.

En España, el transporte por carretera alcanza el 15% del consumo nacional de energía, un 40% del consumo de carburantes. El sector de transportes depende en un 97% de los combustibles fósiles.

## 1.1. Inconvenientes del uso de combustibles fósiles

### 1.1.1. Contaminación

Idealmente, en la quema de hidrocarburos, los únicos productos de esta reacción son dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). En la realidad, esta reacción no sucede de forma ideal debido a otras sustancias presentes tanto en los combustibles como en el propio aire utilizado como comburente, y durante la combustión se producen diferentes sustancias, entre las cuales se encuentran varios compuestos contaminantes. Los productos expulsados

por los vehículos procedentes de la combustión interna del motor son muy

variados, y muchos de ellos provocan grandes daños a la salud de las personas, así como al medio ambiente en general. Esta expulsión hace que los productos contaminantes se acumulen en nuestro aire, sobretodo en zonas urbanas donde son mayores las emisiones, y así afecte a la población residente en estas zonas (imagen x).

En %	Según los límites de	
	La UE	La OMS
Partículas contaminantes		
PM2.5	20-31	91-96
PM10	22-33	85-88
O3	14-18	97-98
NO2	5-13	5-13
BaP	22-31	76-94
SO2	<1	46-54
CO	<2	<2
Pb	<1	<1
Benceno	<1	12-13

Tabla 1: Población europea expuesta a la polución

#### 1.1.1.1. Principales contaminantes producto de la combustión de hidrocarburos

##### 1.1.1.1.1. Monóxido de carbono (CO)

La formación de este compuesto es debida a la combustión incompleta de los hidrocarburos por falta de oxígeno. La emisión de este contaminante está estrechamente ligado al dosado utilizado en el motor, definido como la relación entre la masa de aire y de combustible introducidas en el cilindro, y puede formarse mediante diferentes mecanismos.

Es un componente venenoso para humanos y animales. Una vez respirado, el CO llega a las células sanguíneas fijándose a la hemoglobina en lugar del oxígeno. El CO se adhiere más fuertemente a la hemoglobina que el oxígeno, reduciendo de esta manera la cantidad de

oxígeno que llega a los órganos con sus insalubres consecuencias. El CO es letal incluso en bajas dosis, por lo tanto las personas intoxicadas con CO deben ser rápidamente tratadas en cámaras presurizadas, donde la presión hace que los enlaces entre este compuesto y la hemoglobina sean más fáciles de romper.

#### 1.1.1.1.2. Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

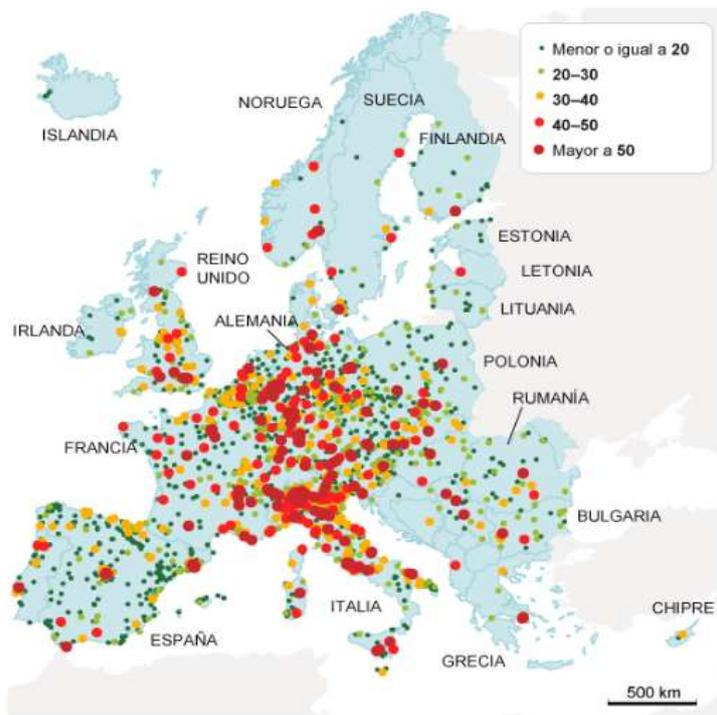


Figura 1: Media anual de dióxido de nitrógeno en microgramos por  $\text{m}^3$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Dentro de los denominados óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), se pueden diferenciar dos compuestos, los cuales son óxido nítrico NO y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Surgen con la reacción entre el nitrógeno del aire y el oxígeno. Teóricamente el nitrógeno es un gas inerte, pero las altas temperaturas y presiones alcanzadas dentro de la cámara de combustión de los motores crean condiciones favorables para esta reacción.

Una vez expulsado a la atmósfera, el NO reacciona con el oxígeno formando  $\text{NO}_2$ . Este es más tarde descompuesto por

la energía ultravioleta del sol en NO y átomos de oxígeno con alta capacidad de reacción que atacan las membranas de las células vivas.

El  $\text{NO}_2$  reacciona con el agua atmosférica formando ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), el cual se disuelve en la lluvia, siendo así un gran responsable de la lluvia ácida, la cual destruye en gran parte los bosques en zonas industrializadas así como monumentos históricos fabricados en mármol.

Son sustancias productoras de smog fotoquímico; además el óxido nítrico es oxidado por el ozono de la atmósfera haciendo que la capa de ozono quede reducida. El dióxido de nitrógeno es un irritante pulmonar y aumenta las probabilidades de contraer enfermedades infecciosas. Estos productos son también gases de efecto invernadero.

#### 1.1.1.1.3. Óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ )

Se generaliza a óxidos de azufre los compuestos monóxido de azufre (SO), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), aunque el más común y el que más concierne al tema de la contaminación es el dióxido de azufre. El monóxido de azufre es un compuesto inestable. El dióxido de azufre, por su parte, tiene una vida en la atmósfera corta, de dos a cuatro días de media, en los que la mitad de las emisiones se depositan en la superficie, mientras que la otra mitad se convierte en iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). El dióxido de azufre, al contacto con el aire y la humedad, con el tiempo se transforma en trióxido de azufre, que junto con el agua produce una reacción rápida y exotérmica formando ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), un ácido muy corrosivo.

Aunque estos compuestos pueden ser liberados de forma natural, principalmente en los volcanes y sus proximidades, más de la mitad de estos son emitidos de forma antropogénica. Los combustibles fósiles tienen una cantidad de azufre, a pesar de ser sometidos a procesos de desulfuración, mediante el cual se extrae parte de esta sustancia, la cual reacciona durante su combustión con el oxígeno formando dióxido de azufre, que es un gas tóxico e irritante. La exposición a este gas en altas concentraciones provoca irritación en el tracto respiratorio, reacciones asmáticas, bronquitis, espasmos reflejos, parada respiratoria y congestión de los conductos bronquiales de los asmáticos.

Una vez ha reaccionado y se ha convertido en ácido sulfúrico, este es uno de los principales causantes de la lluvia ácida antes explicada, junto a los óxidos de nitrógeno.

#### 1.1.1.1.4. Hidrocarburos sin quemar

Estos gases son expulsados por los vehículos debido a la combustión incompleta de los combustibles. Son nocivos dependiendo de su estructura molecular. Muchos de estos son venenosos, portadores de sustancias cancerígenas, como el benceno, e irritantes. Algunos de estos también producen, junto a los óxidos de nitrógeno, smog fotoquímico.

Los principales son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y otros compuestos orgánicos volátiles (COVNM). El metano se trata de un hidrocarburo presente en varios combustibles (principal componente del gas natural), y su combustión incompleta hace que se expulse a la atmósfera, junto a otras fuentes como los vertederos, fermentación entérica en estómagos de los rumiantes o en la propia extracción de combustibles fósiles, por ejemplo. Sus efectos sobre la salud son la asfixia tras la inhalación, por la disminución del contenido de oxígeno, y se trata de un gas altamente inflamable.

#### 1.1.1.1.5. Partículas y humos

Se considera partículas a cualquier materia en estado sólido o líquido en condiciones ambientales que esté presente en los gases de escape. Estas materias pueden sufrir cambios en sus características físicas y químicas por diferentes procesos como son la evaporación, condensación, sedimentación, crecimiento por colisión, procesos fotoquímicos, depósitos en la superficie de las partículas, etc.

Son estos procesos que hemos enumerado, junto a otros, los que diferencian a las partículas primarias, que aún no han sufrido estos procesos, de las secundarias, cuando ya han ocurrido.

#### 1.1.1.1.6. Amoníaco (NH<sub>3</sub>)

El amoníaco (NH<sub>3</sub>) es un contaminante expulsado por los vehículos en baja proporción respecto a otros contaminantes. Este contaminante puede llegar a producir quemaduras graves en la piel, ojos, garganta y pulmones, llegando incluso a provocar ceguera, edema pulmonar o muerte en casos extremos.

Es fácilmente biodegradable y las plantas lo absorben como nutriente importante en su desarrollo.

#### 1.1.1.1.7. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Esta sustancia es el resultado directo de la combustión de hidrocarburos o carbón. El dióxido de carbono es un gas que se encuentra en nuestra atmósfera de forma natural, ya que se produce en la descomposición de materia orgánica, incendios forestales o en la propia respiración de los animales. No obstante la cantidad de este gas en la atmósfera está creciendo considerablemente debido al uso de combustibles fósiles por parte del ser humano en diferentes sectores (gráfica x). El transporte representa una gran proporción de las emisiones de este gas, aunque no es la única. El desarrollo de la industria y el uso de combustibles fósiles hacen que las emisiones de este tipo de gases vayan en aumento.

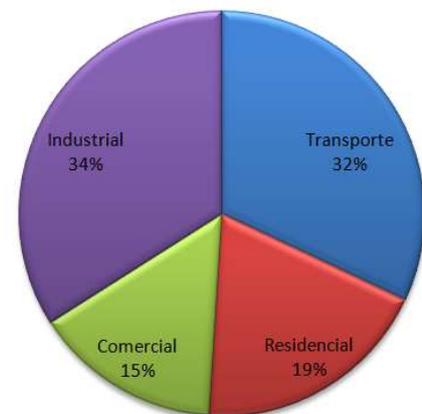


Gráfico 2: Distribución de las emisiones de dióxido de carbono de 1980 a 1999

EL CO<sub>2</sub> es usado por las plantas junto al agua y la luz del sol para el proceso de la fotosíntesis por el cual absorben energía. Pero el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> imposibilita a las plantas a

procesar tanta cantidad de este gas, haciendo que se acumule en la atmósfera. Este es el principal gas de efecto invernadero.

### 1.1.1.2. Consecuencias de los contaminantes expulsados por los MCIAs

Los contaminantes que se expulsan a la atmósfera tienen consecuencias perjudiciales para el medio ambiente en general, como ya se ha resumido anteriormente. De todos estos contaminantes, gran parte de ellos son emitidos por vehículos. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, en 2005 aproximadamente el 24,5% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en Europa fueron debidas al transporte por carretera, así como el 41,9% de los NO<sub>x</sub>, el 46,9% del CO y el 22,8% de los hidrocarburos. Podemos ver cómo este sector constituye una gran parte de las emisiones contaminantes totales.

Los contaminantes que emiten los MCIAs tienen unas consecuencias determinadas. Aquí se explican las más importantes.

#### 1.1.1.2.1. Calidad del aire y salud

Se denomina calidad del aire al factor que mide la cantidad de polución atmosférica que este tiene. Por lo tanto, cuanto menor sea la calidad del aire de una zona urbana cualquiera, más proporción de contaminantes existirán en el ambiente.

Air Quality Index Levels of Health Concern	Numerical Value	Meaning
Good	0 to 50	Air quality is considered satisfactory, and air pollution poses little or no risk.
Moderate	51 to 100	Air quality is acceptable; however, for some pollutants there may be a moderate health concern for a very small number of people who are unusually sensitive to air pollution.
Unhealthy for Sensitive Groups	101 to 150	Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is not likely to be affected.
Unhealthy	151 to 200	Everyone may begin to experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects.
Very Unhealthy	201 to 300	Health alert: everyone may experience more serious health effects.
Hazardous	301 to 500	Health warnings of emergency conditions. The entire population is more likely to be affected.

Tabla 2: Escala de calidad del aire definida por "Environmental Protection Agency"

Según recientes estudios, la contaminación atmosférica es el factor ambiental que produce un mayor impacto en la salud europea. Esto se traduce en que aproximadamente veinte millones de ciudadanos europeos sufren problemas respiratorios, especialmente los residentes de zonas urbanas, como consecuencia de la baja calidad que el aire de estos lugares tiene. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2012, la contaminación genera tres millones de defunciones directamente relacionadas con la contaminación al año, lo que supone un 5,3% de las muertes totales, siendo el 40% atribuido a la contaminación urbana y el 60% restante a contaminación en espacios cerrados. A su vez, en 2013, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de esta organización

determino que la contaminación del aire exterior es cancerígena para el ser humano, y que esta está estrechamente relacionada con la creciente incidencia del cáncer, en especial el cáncer de pulmón, aunque también relacionado con el de vías urinarias y vejiga.

Es por todo esto que la calidad del aire es un factor el cual podemos relacionar directamente con la salud pública y el crecimiento de enfermedades de diferente índole.

La calidad del aire se mide por la cantidad de diferentes contaminantes en el aire, y se pueden usar varias escalas para su denominación. La más usual es la definida por la “Environmental Protection Agency” de Estados Unidos, dividida en seis apartados (imagen x) según cinco criterios: el ozono al nivel del suelo, cantidad de partículas, de monóxido de carbono, de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

En la siguiente imagen se puede observar puntos alrededor del mundo con su puntuación y nivel de calidad del aire según esta escala.

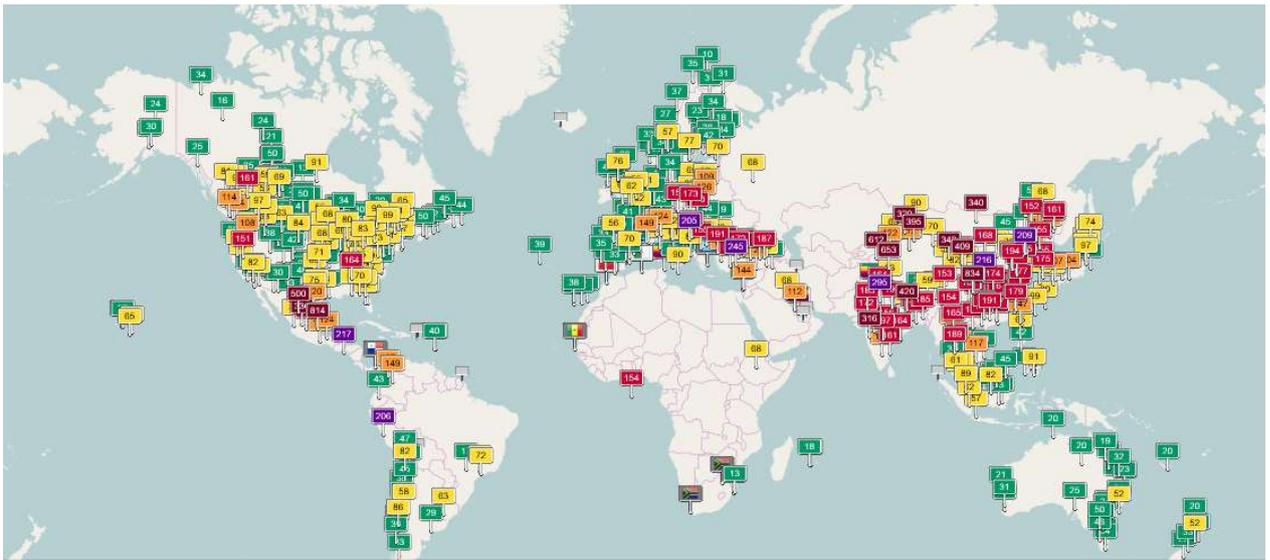


Figura 2: Clasificación de diferentes puntos del mundo según su calidad del aire

#### 1.1.1.2.2. Calentamiento global y gases de efecto invernadero

En la actualidad, la Tierra está sufriendo lo que se denomina como calentamiento global. Esto es un proceso que se define como el aumento gradual de la temperatura en el clima global de la Tierra y, aunque la causa aún está en debate, la mayor parte de la comunidad científica achaca este hecho al aumento de los denominados gases de efecto invernadero.

La energía que recibe la Tierra es íntegramente emitida por el sol. Esta, en forma de radiación electromagnética, llega a la tierra y es absorbida por esta para ser más tarde irradiada. Los gases de efecto invernadero se acumulan en la atmosfera e impiden la expulsión de los rayos solares arrojados por la Tierra, redirigiéndolos nuevamente hacia la superficie terrestre y consecuentemente aumentando la energía recibida y así, la temperatura global de la Tierra. Este aumento de la temperatura, por pequeño que sea, crea un desequilibrio en los ciclos climáticos terrestres y, como consecuencia, en los seres vivos.

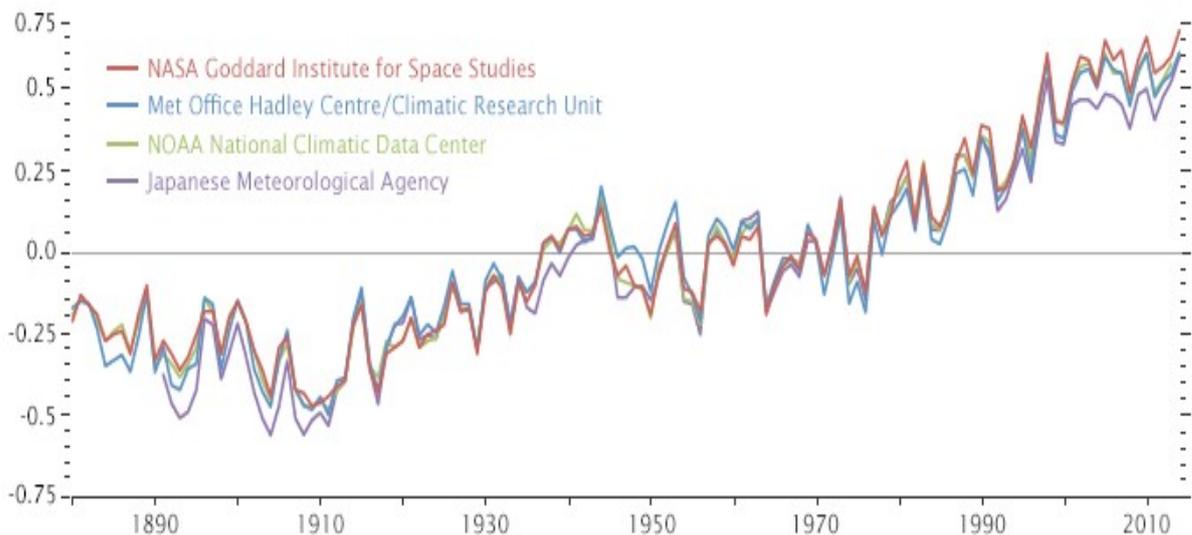


Gráfico 3: Anomalías anuales de temperatura en la Tierra (°C)

Fuente la NASA

Las consecuencias de este cambio climático son la desaparición de algunas especies, lo que aparte de afectar a la biodiversidad también puede desestabilizar las reservas naturales de las que se nutren algunas poblaciones, así como la migración de animales a lugares cálidos que antes no lo eran, pudiendo acabar con poblaciones de especies autóctonas y variando así la forma de vida de los habitantes de esas zonas. Un ejemplo de estos cambios sería el observado en el mar Mediterráneo, donde han sido avistadas barracudas del mar Rojo.

Otra consecuencia importante es el deshielo de los polos. El aumento de la temperatura global hace que los polos sufran un deshielo que provoca daños en la biodiversidad de la zona, así como una subida global del nivel del mar, provocando inundaciones y cambios en los diferentes ecosistemas marítimos.

Los cambios de temperatura también son los causantes de diferentes fenómenos climáticos como por ejemplo “El Niño”, el cual está relacionado con el calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial, manifestándose de forma más intensa en la zona intertropical, donde se sufren fuertes lluvias. Los efectos de este y otros fenómenos pueden ser desde las pérdidas agrícolas o pesqueras, pasando por escasez de agua, cambios de temperatura, hasta la pérdida de hogares.

El aumento de los gases de efecto invernadero se debe en gran parte a la deforestación y la quema de combustibles fósiles, como los utilizados en los motores de combustión interna de los vehículos. Los gases expulsados por los automóviles dotados de motor de combustión interna alternativo, considerados de efecto invernadero, son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

#### 1.1.1.2.3. Smog

El conocido como smog en las ciudades, término creado a partir de las palabras inglesas “smoke” (humo) y “fog” (niebla), se define como una contaminación atmosférica de las ciudades producida por la existencia de una serie determinada de productos contaminantes, así como de unas circunstancias climatológicas favorables.

Concretamente, algunos de los gases de escape de los vehículos, emitidos también por otras fuentes, generan el denominado smog fotoquímico. Este tipo de smog aparece por la liberación al aire de contaminantes primarios, los cuales son los ya nombrados óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles, y otro tipo de contaminantes secundarios, como el ozono, nitrato de peroxiacilo o radicales hidroxilos, entre otros, que son formados gracias a la reacción de los primarios debido a la energía solar.

Este tipo de smog es muy perjudicial para la salud con consecuencias como problemas respiratorios debido a la irritación, anemia, daños en el hígado, cáncer, diversas enfermedades como gripe o tuberculosis e irritación en los ojos y la piel.

### 1.1.2. Energía no renovable

Mientras que en las fuentes de energía renovables el consumo no supera la producción, en las energías no renovables hay una cantidad limitada de estas en la naturaleza las cuales no podrán ser sustituidas una vez consumidas. Los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovables. Esto se debe a que este tipo de combustibles se producen por medio de diferentes procesos biogeoquímicos a lo largo de millones de años (De 600 a 400 millones de años) por el cual materias vivas, en su mayoría plantas, mueren y son cubiertas por sedimentos lentamente, creando a lo largo de los años las condiciones de presión y temperatura adecuadas para que se acaben transformando en los compuestos que hoy

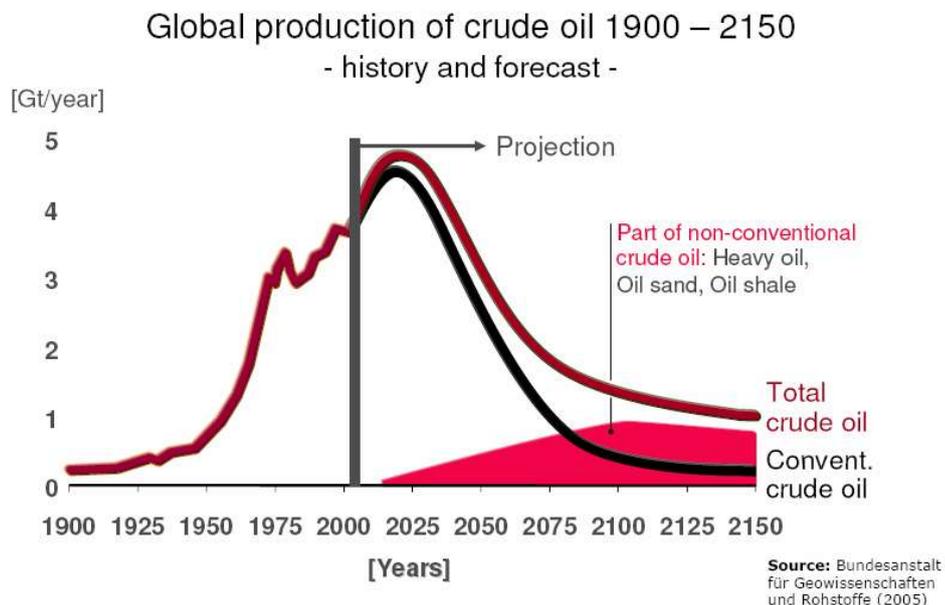


Gráfico 4: Producción global de petróleo crudo

extraemos de esos lechos. De esta manera, cuando se acaben las reservas, no se podrán alimentar los MCIAs que propulsan a los vehículos convencionales.

No es posible saber con exactitud la cantidad de combustibles fósiles que se encuentran en reservas naturales, puesto que los yacimientos de los que se extraen estos materiales son descubiertos nuevamente y con diferentes tamaños; pero de lo que podemos estar seguros es que estas reservas son limitadas, y en algún momento, siguiendo el consumo que tenemos de combustibles, estas se agotarán.

Por añadido, estamos viviendo un crecimiento demográfico elevado desde mediados del siglo pasado. Este crecimiento en la población mundial agrava el problema de los combustibles

fósiles, ya que se crea un aumento de la demanda de estos. El aumento de la demanda, unido a la disminución de la oferta provoca una subida de precio de venta y, en este caso, una desaparición de las reservas de este compuesto.

Dada la gran dependencia que tenemos de los combustibles fósiles y, después de lo expuesto, queda patente que es necesario buscar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles y, de ser posible, renovables para no sufrir las mismas consecuencias. Este cambio no puede realizarse inmediatamente, y es necesario un desarrollo tecnológico importante, por lo que iniciarlo en este momento es la mejor opción.

## **1.2. Medidas**

El transporte está en una continua evolución e innovación como todo sector tecnológico o económico, pero esta evolución no progresa con la suficiente velocidad para afrontar de la mejor manera posible la problemática asociada a la continua emisión de contaminantes al medio ambiente.

Desde el descubrimiento de la relación de todas las consecuencias nefastas explicadas anteriormente con la emisión de los diferentes contaminantes, se han aplicado varias políticas para intentar atacar al problema. Aunque se constatan progresos en la reducción de emisiones que provocan contaminación atmosférica, así como la mejora de la calidad del aire en ciudades europeas gracias a normativas sobre emisiones más rigurosas, estas medidas no son suficientes para acabar con el problema.

Los contaminantes no provienen únicamente de las emisiones de los vehículos, siendo otra gran fuente de contaminantes la industria, por ejemplo, pero sí que juegan un papel fundamental en este ámbito. El sector transporte supone el 19% del uso global de la energía, así como el 23% de las emisiones totales de dióxido de carbono a la atmósfera. Además, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) prevé un aumento significativo de la demanda de petróleo para este sector. En Europa la tasa de crecimiento de gases de efecto invernadero respecto a 1990 ha sido superior en el sector de transporte que en cualquier otro.

En este apartado se va a realizar una enumeración de algunas de las acciones que pueden ayudar a la máxima reducción de emisión de contaminantes por parte del sector de transportes.

### 1.2.1. Uso de la energía eléctrica

Una vez asimilada la problemática que atraen los combustibles fósiles, se debe entender que su sustitución por otro tipo de fuente de energía para la propulsión de los automóviles es imprescindible para acabar con las emisiones que estos generan y, consecuentemente, los efectos que producen dichos gases.

Una posible energía que sustituya a los hidrocarburos es la energía eléctrica. Esta energía es generada por diferentes métodos. La más usada se basa en la propulsión de motores de combustión como turbinas de gas o de vapor mediante la quema de hidrocarburos (imagen x), pero, por otra parte, también encontramos formas de generar energía eléctrica mediante fuentes renovables,

como son la energía eólica, la solar, la energía potencial hidráulica o la mareomotriz entre otras. También se puede conseguir energía

eléctrica de fuentes que, aunque no

sean renovables, no requieren de la quema de hidrocarburos. Mediante centrales nucleares se genera energía eléctrica gracias a generadores y el calor desprendido a partir de la fisión de átomos de combustibles nucleares (comúnmente uranio-235 y plutonio-239). El gran inconveniente de este método son los desechos radiactivos que generados y la imposibilidad de su reciclaje.

(Billones de Kilovatio-hora)			
Naciones del G8	Utilización de Combustibles Fósiles	Total	%
Alemania	354.78	561.57	63.2%
Canadá	154.55	569.41	27.1%
Estados Unidos	2,758.65	3,891.72	70.9%
Francia	52.23	535.45	9.8%
Italia	223.16	268.18	83.2%
Japón	640.17	982.76	65.1%
Reino Unido	278.21	373.26	74.5%
Rusia	569.72	869.07	65.6%

Tabla 3: Energía eléctrica producida a partir de combustibles fósiles

#### 1.2.1.1. Vehículos eléctricos (EV)

El concepto del vehículo propulsado mediante energía eléctrica parece hacer referencia a una idea moderna y novedosa, pero lo cierto es que los orígenes de esta se remontan al siglo XIX, donde tecnologías alternativas al motor de vapor comienzan a hacer su aparición. Robert Anderson, inventor escocés, entre 1832 y 1839 inventó el primer automóvil eléctrico, aún rudimentario, alimentado por una pila de energía no recargable. Poco después se patenta la línea electrificada, de uso únicamente para trenes y trolebuses. Comienza así una sucesión de mejoras y variaciones sobre el vehículo eléctrico. En 1864, en la carrera de París a Rouen se

consiguió realizar 1135 Km en 48 horas y 53 minutos, una velocidad media de 23,3 Km/h, lo que superaba con creces a los carruajes tirados por caballos. Es en este momento donde el público se empezó a interesar en automóviles no propulsados por caballos.

En 1876 Nicholas Otto desarrolla el primer motor de gasolina y, en 1886, es desarrollado el primer vehículo de funcionamiento completo mediante la gasolina por Karl Benz. Comienza así un competitivo desarrollo de ambos tipos de vehículos luchando por imponerse cuyo final fue la derrota de la energía eléctrica como fuente de energía para vehículos durante la Primera Guerra Mundial, época de gran desarrollo de los MCI, donde la velocidad, potencia y autonomía fueron factores decisivos.

Los vehículos eléctricos, pese a la gran expansión que cobraron los motores de combustión interna, seguían siendo una opción favorable para los usuarios, debido al poco ruido que generaban, su simplicidad, la autonomía y su coste razonable. Sin embargo el tiempo de recarga y el elevado peso que adquirirían debido a las grandes baterías afectaron en el desuso generalizado de estos vehículos.

La concienciación sobre la problemática de las emisiones cerca de los años sesenta, unida a la primera crisis del petróleo de 1973, fueron impulsores de la reaparición de vehículos eléctricos en la escena, siendo una alternativa al petróleo y un método más sostenible. Esto ha llevado a una segunda etapa de desarrollo para los coches eléctricos con notables mejoras. El desarrollo de baterías de ion de litio ha permitido una mayor capacidad de carga, que supone una mayor autonomía. Además, la potencia suministrada por estos motores es actualmente, aunque menor a los de los motores de combustión interna, suficiente para la propulsión de turismos y vehículos ligeros, teniendo limitaciones para su aplicación a vehículos pesados como camiones o autobuses.

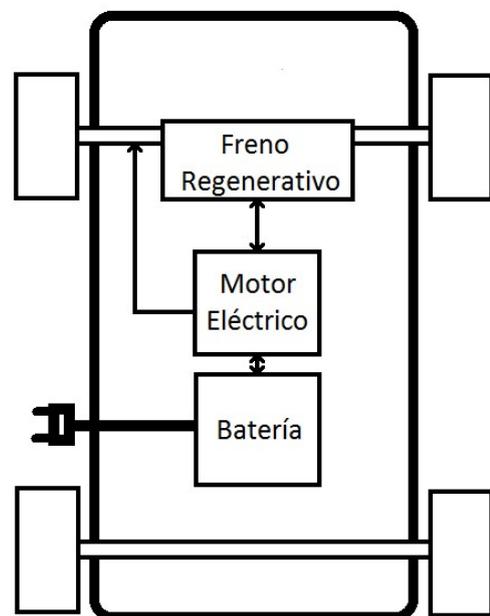


Figura 3: Esquema de funcionamiento de vehículo eléctrico

Por otra parte, también hay que tener en cuenta que la inclusión de la componente eléctrica en los vehículos no solo afecta al vehículo en sí. Sería necesario crear una red de infraestructuras específicas para este tipo de vehículos. La carga



dos convertidores de energía diferentes y dos sistemas diferentes de acumulación de energía (instalados en el vehículo) para su propulsión.”

Los vehículos híbridos son por lo tanto propulsados mediante dos fuentes de energía, usualmente un motor eléctrico y otro de combustión alimentado con hidrocarburos. Teniendo en cuenta lo explicado, a partir de este momento cuando se aluda a vehículos híbridos se hará referencia a este tipo de vehículo híbrido.

La historia del vehículo híbrido también se remonta a los inicios del automóvil. Los primeros vehículos híbridos se expusieron en 1899, en el Salón de París de 1899. Creado por los hermanos Pieper, se trataba de un híbrido dotado de un pequeño motor de gasolina enfriado por aire, asistido por un motor eléctrico el cual sacaba la energía de baterías de plomo y ácido. Las baterías eran cargadas por el motor de combustión en diferentes situaciones y, el motor eléctrico era accionado cuando era necesaria una potencia adicional. El otro vehículo híbrido presentado en esa misma feria estaba derivado de un vehículo puramente eléctrico, comercializado por Vendovelli y Priestly. Se trataba de un triciclo accionado por dos motores eléctricos, uno para cada rueda. También contaba con un motor de gasolina para poder recargar las baterías y así aumentar la autonomía del vehículo.

Desde entonces los vehículos híbridos se han ido desarrollando junto a los vehículos eléctricos y de combustión, adaptando ambas tecnologías y fusionándolas.

Hay diferentes tipos de vehículo híbrido, y diferentes tipos de disposición del tren propulsor. Aquí explicaremos los principales vehículos eléctricos que cuentan con MCIA y motor eléctrico.

## 1.2.1.2.1. Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

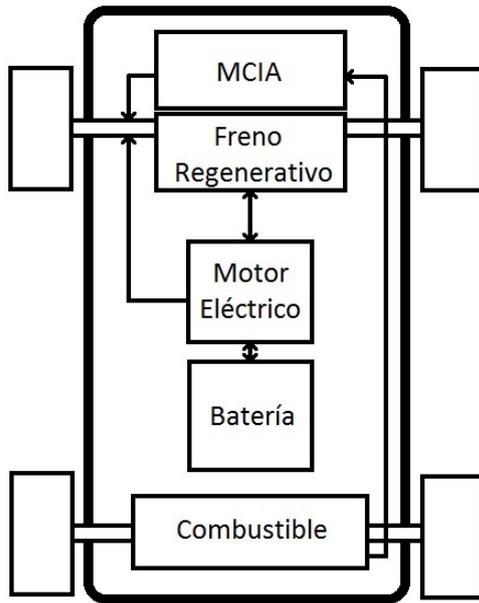


Figura 5: Esquema de funcionamiento de vehículo híbrido

En este tipo de vehículos el MCIA es alimentado por combustibles fósiles y el motor eléctrico por una o varias baterías eléctricas. Estas baterías que alimentan el motor eléctrico recogen la energía perdida en cada frenada o deceleración. Esta recogida se basa en el uso de los frenos regenerativos, los cuales son un tipo de frenos dinámicos que nos permiten recoger la energía cinética almacenada en el vehículo cuando frenamos o en fuertes pendientes y así convertirla en energía eléctrica y almacenarla en las baterías para su posterior uso. El uso de esta energía almacenada no nos aporta una gran autonomía al vehículo.

Este tipo de automóviles híbridos no usa energía eléctrica generada por fuentes renovables de energía, sino que recoge la energía generada por los combustibles fósiles, que es perdida en los vehículos convencionales, y la utiliza cuando sea necesario. Es por tanto un método de disminución del consumo de combustibles fósiles mediante su mejor aprovechamiento. Por lo tanto con este vehículo en ningún momento se consiguen unas emisiones nulas.

Por otra parte, con este tipo de vehículos no es necesario desarrollar una red de infraestructura de carga, ya que se carga mediante la energía de los combustibles fósiles, aunque sí que se introducen nuevos componentes, como el motor eléctrico y las baterías, que necesitan de sus correspondientes tratamientos y reparaciones.

## 1.2.1.2.2. Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV)

En estos vehículos híbridos encontramos también un MCIA y un motor eléctrico como en el caso anterior. La principal diferencia radica en que en estos, las baterías eléctricas que dan propulsión al motor eléctrico pueden ser recargadas mediante el acople a la red eléctrica. La carga de las baterías mediante la red eléctrica no excluye el uso de los frenos regenerativos, lo cual permite también aprovechar la energía de los MCIA y conseguir así más autonomía de las baterías eléctricas.

Con este tipo de vehículos híbridos, no solo aprovechamos la energía perdida por los MCIA al igual que en los no enchufables, sino que también podemos usar energía eléctrica que no provenga de esta fuente, ayudando así a la reducción de emisiones contaminantes por la quema de combustibles fósiles.

De esta manera sí que necesitaremos una infraestructura de carga al igual que en los vehículos eléctricos, además de los elementos especializados.

#### 1.2.1.2.3. Clasificación según la disposición del tren propulsor

Se puede hacer también una clasificación de los coches híbridos dependiendo del trayecto que recorre la energía hasta llegar a las ruedas.

##### 1.2.1.2.3.1. En serie

En los vehículos híbridos, cuyo tren propulsor esté dispuesto en serie, contamos con dos fuentes de energía que alimentan a un único mecanismo de propulsión. Disponemos por lo tanto de un MCIA y de baterías eléctricas, los cuales conjuntamente alimentan al motor eléctrico que propulsa el eje motriz de nuestro vehículo.

Los vehículos híbridos en serie pueden operar en los siguientes modos:

1. Modo eléctrico: El MCIA no está en funcionamiento y la fuente de energía del vehículo son las baterías eléctricas.
2. Modo combustión: La energía que propulsa el vehículo llega únicamente del MCIA mientras que las baterías ni absorben ni proporcionan. La red eléctrica sirve únicamente como conexión entre el MCIA y las ruedas motrices.
3. Modo híbrido: La fuerza de propulsión es extraída de ambas fuentes de energía, el MCIA y las baterías.
4. Propulsión por combustión y carga de baterías: El MCIA genera energía para cargar las baterías y propulsar el vehículo.

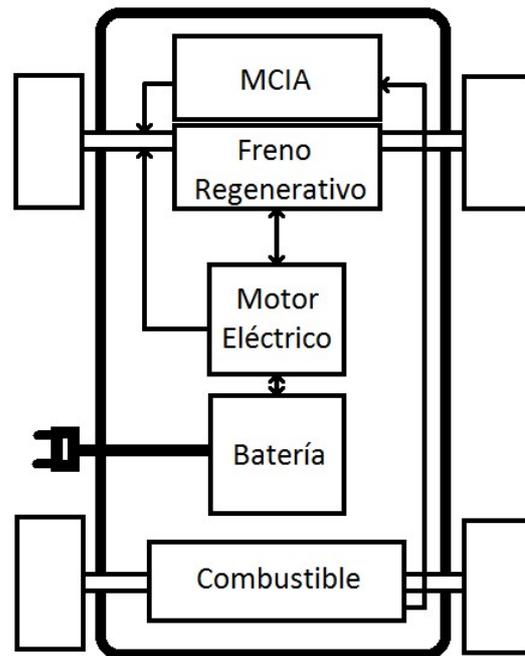


Figura 6: Esquema de funcionamiento de vehículo híbrido enchufable

La mayor ventaja que conlleva esta disposición es que, al no suministrar el motor directamente la potencia, puede estar trabajando a un régimen óptimo previamente seleccionado y así, por ejemplo, reducir su consumo, o proporcionar una potencia adecuada para el alternador.

#### *1.2.1.2.3.2. En paralelo*

En un vehículo híbrido cuyo tren propulsor esté dispuesto en paralelo, tanto el MCIA como el motor eléctrico suministran potencia a las ruedas propulsoras de forma independiente. Ambas potencias se acoplan mecánicamente para llegar a las ruedas. De esta manera es posible que el vehículo sea propulsado por el MCIA sin el motor eléctrico, por el motor eléctrico y sin el funcionamiento del MCIA, o por ambos a la vez; luego no es necesaria la transformación de la energía proporcionada por el MCIA en energía eléctrica para ser usada por el vehículo.

La ventaja que supone esta disposición frente a la anterior radica en las pérdidas que conllevan la conversión de la energía suministrada por el motor de combustión para ser usada por el motor eléctrico. Al estar directamente acoplado a la transmisión nos ahorramos estas pérdidas de transformación.

#### *1.2.1.2.4. Ventajas y desventajas de la utilización del coche híbrido*

Como hemos visto cuando hablamos de un vehículo híbrido con MCIA y motor eléctrico no solo hablamos de un tipo de estos, sino que contamos con diferentes posibilidades que pueden satisfacer las múltiples necesidades que tengamos.

De esta manera se pueden solventar los problemas presentados en el motor eléctrico. La baja potencia que el motor eléctrico puede suministrar es complementada con la proporcionada por el motor de combustión o, simplemente, el motor eléctrico complementa en algún momento el MCIA. Por otra parte, al tener dos fuentes de energía, no se necesitan baterías tan grandes para disponer de una autonomía comparable a los vehículos actuales.

En cuanto a las infraestructuras necesarias, como se ha visto, cambian dependiendo del tipo de vehículo híbrido.

Con este tipo de vehículos no se implanta una solución tajante a la emisión de contaminantes ya que continuamos proporcionando energía que proviene de la quema de hidrocarburos, pero esta se ve reducida ya que parte de la potencia viene de la energía eléctrica y se aprovecha mejor la energía proporcionada por los MCIA. Se debe considerar por lo tanto un paso necesario hacia la irremediable implantación completa de los vehículos eléctricos; una

implantación por ahora compleja debido a las dificultades tecnológicas, económicas y sociales que han de ser superadas hasta que esta llegue.

### **1.2.1.3. Frenada regenerativa**

Ya nombrada anteriormente, se trata de una tecnología que es usada por prácticamente todos los modelos del mercado para reducir el gasto energético.

La frenada regenerativa permite a los vehículos aprovechar la energía cinética que se pierde durante cada frenada o deceleración, disipada usualmente en forma de calor en los frenos, y convertirla en energía eléctrica para más tarde, ser en la propulsión del vehículo.

El funcionamiento de este tipo de frenada se basa en el uso de generadores eléctricos, los cuales convierten la energía mecánica en energía eléctrica, como forma de frenado para así aprovechar el máximo de energía cinética que posee el vehículo antes de frenar.

El consumo de combustible en un vehículo sin frenada regenerativa para un periodo de conducción determinado se determina mediante la cantidad de energía de tracción necesaria para impulsar al vehículo, teniendo en cuenta el rendimiento con el que la energía se hace llegar a las ruedas. Por el contrario, si se introduce el concepto de frenada regenerativa, el consumo se reduce considerablemente debido a la energía cinética que es almacenada en cada frenada o desaceleración para ser aprovechada nuevamente en la tracción, considerando igualmente el rendimiento de este ciclo.

### **1.2.2. Uso de combustibles alternativos**

Existe una gran variedad de combustibles para los motores de combustión interna alternativos y los podemos encontrar tanto en forma líquida como en gaseosa, descartando los combustibles sólidos debido a las altas exigencias de dichos motores de velocidad de mezcla y reacción. Los más conocidos son los combustibles fósiles, que podemos encontrar de forma tanto líquida (gasolina, queroseno, alcoholes, GTL, gasóleo...) como gaseosa (gas natural, butano, GLP, ésteres...); pero también encontramos otro tipo de combustibles como los biocombustibles líquidos (metanol, aceites crudos, ésteres etílicos...) o gaseosos (tanto sintéticos como biogás).

Los actuales automóviles mayoritariamente cuentan con dos tipos de motor, los dos de combustión interna alternativos; los motores de encendido provocado (MEP) basados en el ciclo Otto y los motores de encendido por compresión (MEC) basados en el ciclo Diesel. La principal diferencia entre ambos radica en que en los MEP, la combustión se genera mediante un aporte

de energía externo al ciclo termodinámico, lo que actualmente se realiza mediante una chispa que hace saltar la bujía, y en los MEC la combustión se realiza mediante el autoencendido de la mezcla al alcanzar la temperatura adecuada en la cámara de combustión debido al proceso de compresión.

### 1.2.2.1. Gases Licuados de Petróleo

El gas licuado de petróleo (GLP), o Autogás si es destinado a vehículos, es un combustible gaseoso a presión atmosférica y temperatura ambiente, de origen fósil y derivado del petróleo, el cual se puede licuar, proceso por el cual cambia de estado gaseoso a líquido debido al aumento de presión y temperatura, a una presión moderada, siempre inferior a 10 bar. Es una combinación compleja de hidrocarburos producida tanto por destilación y condensación del petróleo crudo como de la extracción de gas natural. Está compuesta por hidrocarburos con un número de carbonos en un intervalo de  $C_3$  a  $C_5$ , principalmente propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ).

Este tipo de combustible tiene una relación hidrógeno/carbono alta (de 2,5 a 2,6), lo que significa que cuenta con menos proporción de carbono, derivando así en una reducción en las emisiones de  $CO_2$ .

En cuanto a las emisiones de  $NO_x$  el uso de GLP supone una reducción considerable de estas emisiones, en especial comparándolo con el gasóleo, el cual tiene unas emisiones elevadas de este tipo de compuesto. También reduce prácticamente por completo las emisiones de partículas.

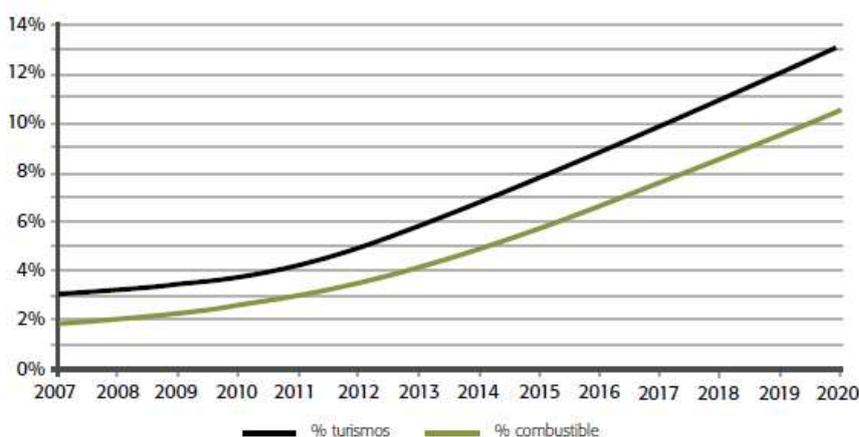


Gráfico 5: Evolución del uso del GLP en Europa

Otro factor importante a tener en cuenta es la emisión de ruido, que provoca efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de los seres vivos. Los motores convencionales emiten bastante ruido y, con la utilización del GLP, se consigue reducir dichas emisiones en

hasta un 50%.

El GLP, además, es un combustible con menos costes de inversión y explotación que los combustibles usados actualmente. Como sabemos, el precio de los combustibles fósiles oscila, pero aproximadamente este cuesta un 40%- 50% menos que la gasolina de 95 octanos. El coste de explotación (€/Km) se reduce hasta un 50% respecto también a la gasolina.

Su octanaje, cualidad antidetonante de los combustibles, es inferior al gas natural y superior al de la gasolina, por lo tanto, estamos hablando de un combustible adecuado para un motor de encendido provocado.

Hoy en día, casi cualquier fabricante de vehículos ofrece modelos GLP. También existen talleres especializados donde se convierten vehículos estándar a GLP. El GLP es el combustible alternativo más extendido del mundo, aunque su utilización a lo largo de diferentes países es irregular. En Europa el GLP alcanza el 3% del combustible total destinado a transporte, ascendiendo al 10% según la Asociación Europea del GLP (AEGLP), utilizando el 13% de los turismos este combustible.

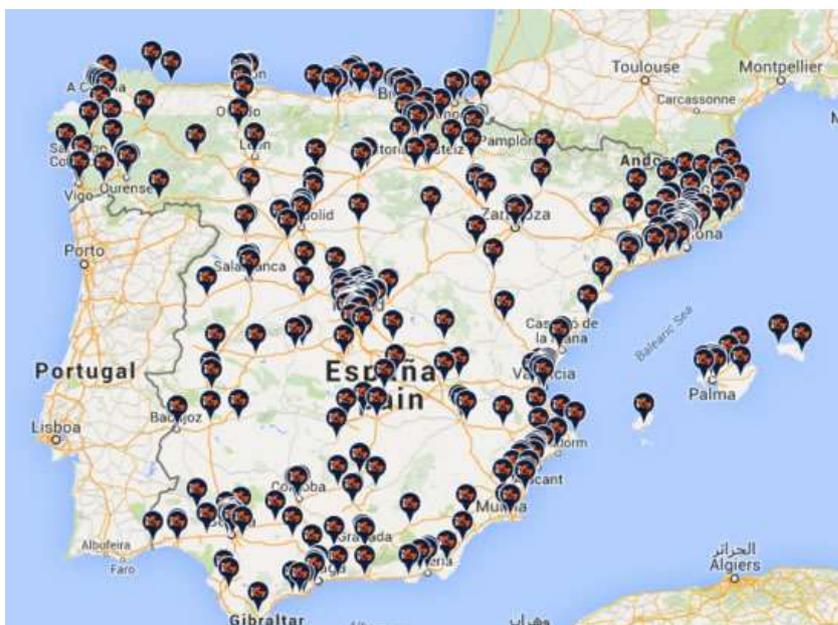


Figura 7: Puntos de suministro de GLP para vehículos en España

Un posible inconveniente es el número de puntos de repostaje de este combustible. Las gasolineras que dan repostaje de los combustibles para vehículos convencionales, es decir, gasolina y gasóleo, no siempre ofrecen un servicio de repostaje de GLP. Por esta razón es necesario

estudiar la cercanía de puntos de repostaje si queremos adquirir o adaptar un coche a GLP. No obstante, las gasolineras que dan este servicio son amplias a lo largo del territorio español (Imagen x), y cada vez son más las que lo ofrecen.

El GLP cumple por lo tanto diversos requisitos que lo hacen idóneo para la alternativa combustible que dé el paso hacia un modelo de transporte sostenible como son la reducción de emisiones contaminantes y ruidos, además de constituir una alternativa más económica a la gasolina y el gasóleo.

### 1.2.3. Transporte público

Las grandes cantidades de contaminantes que son expulsadas al medio ambiente por los vehículos se deben en gran medida a la ingente cantidad de vehículos que se desplazan por las carreteras actualmente. En España, el consumo de carburantes por parte del transporte por carretera asciende a un 80% del total, y de este, el 40% es parte del transporte por medio del automóvil privado. Estos vehículos, normalmente, en el caso de tratarse de vehículos para transporte de personas y no mercancías, no circulan con el máximo de su capacidad de personas transportadas, en muchos casos siendo una única persona la que viaja en este. De esta manera, se genera una gran proporción de gases contaminantes con respecto al número de personas que realiza el trayecto.

Este problema tiene una fácil solución, que se basa en el uso generalizado del transporte público. En este tipo de transporte, pueden circular un gran número de personas en un solo vehículo cuyas emisiones serán mayores, pero menores con respecto al uso de vehículos privados

## 1.3. Evolución del mercado

Los modelos actuales de transporte público con la implementación de la tecnología eléctrica o híbrida y/o que utilicen GLP como combustible es variado, aunque reducido en su producción y puesta en marcha. En este apartado se realiza una revisión de los modelos más importantes o influyentes.



Figura 8: Trolebús chileno en 1989

### 1.3.1. Trolebús

Este tipo de vehículo de transporte de pasajeros está impulsado por la energía eléctrica que le llega a través de dos cables conectados a un tendido eléctrico situado en la parte superior del autobús. De esta manera el trolebús tiene una ruta determinada y no se

puede desviar, a excepción de la instalación de una pequeña fuente de almacenamiento de energía.

Fue creado por Ernst Werner von Siemens en 1882 con su Elektromote. La primera línea experimental fue presentada en la Exposición Universal de París de 1900, siendo instalada la primera línea en Bielathal (Alemania) en 1901.

### 1.3.2. Mercedes OE302

Este autobús presentado por Daimler en 1969 en el salón del automóvil de Frankfurt es considerado el primer autobús híbrido de la historia. Con 11 metros de longitud, este autobús estaba impulsado con un motor eléctrico de 156 CV en régimen continuo, con una potencia máxima de 204 CV. Cinco bloques de baterías de 3,5 t de peso total alimentaban este motor con una tensión de 380 V. El autobús tenía una autonomía puramente eléctrica de 2,5h, utilizando un motor diésel de cuatro cilindros y 3,8 l de cilindrada, el cual desarrollaba una potencia nominal de 65 CV, que operando a régimen constante, alimentaba a las baterías para aumentar la autonomía. Este modelo ya contaba con la tecnología de la frenada regenerativa.



Figura 9: Mercedes OE302

### 1.3.3. Irizar i2e

La marca guipuzcoana Irizar lanzó un autobús 100% eléctrico, el Irizar i2e. Con una autonomía de 200 a 250 Km en un tiempo de carga de 5 horas, lo que equivale a un tiempo de recorrido en ambiente urbano de unas 14 o 16 horas. El chasis y la carrocería están fabricados en aluminio para compensar el peso de las baterías, y la marca asegura una vida útil de 600.000 Km o 12 años.



Figura 10: Irizar i2e

### 1.3.4. Tempus Autogas

Fruto de la alianza de Repsol y la carrocería Castrosua, nace el Tempus Autogas en el 2012, el



Figura 11: Tempus Autogas

primer autobús híbrido enchufable que utiliza GLP como combustible. Las baterías níquel-sodio alimentan al motor, otorgándole una autonomía de 60 Km en el modo puramente eléctrico, llegando a 300Km en el modo híbrido, con el uso de GLP como combustible. Este autobús fue probado como prototipo en Valladolid, de mano de la empresa de autobuses Auvasa (Autobuses Urbanos de Valladolid S.A.).

## 1.4. Conclusiones

El uso de combustibles de origen fósil, como se ha explicado con detalle anteriormente, conlleva la liberación al aire de varias sustancias peligrosas tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Es por esto que hay que modificar el modelo energético actual para solucionar este problema.

El sector del transporte utiliza gran cantidad de este tipo de combustibles, y actualmente contamos con varias vías de acción para cambiar la situación. Los vehículos eléctricos, modelo ideal para la posible reducción total de emisiones (siempre teniendo en cuenta el origen de esta energía eléctrica), no está todavía a nuestro completo alcance en cuanto a las prestaciones que nos ofrece y la multitud de necesidades. La implantación de este tipo de vehículos se prevé en un periodo corto de tiempo, pero hasta entonces, el vehículo híbrido parece el paso más sensato hacia este objetivo. Esto, unido al uso de combustibles alternativos que tengan menos emisiones que los usados actualmente, y el impulso de la utilización del transporte público como ayuda a la reducción de emisiones son algunas de las posibles medidas en un camino que nos lleve a la sostenibilidad ecológica.

Es por todos estos motivos que este trabajo de fin de grado realiza un estudio teórico de la aplicación de una unidad de potencia híbrida con un motor eléctrico y otro de combustión interna alternativo con GLP como combustible, a un autobús urbano destinado al transporte público.



## **2. Objetivos**

Es vital antes de comenzar el desarrollo del proyecto, definir una serie de objetivos que se van a tratar de alcanzar y, que van a servir de guía a lo largo del camino que seguiremos hasta llegar a los mismos.

Tendremos un objetivo principal del proyecto y, para llegar este definiremos una serie de objetivos específicos que nos ayudaran a completar todos los aspectos necesarios.

## **2.1. Objetivo principal: Estudio de viabilidad de uso de GLP como combustible para motores híbridos de transporte urbano**

El objetivo principal del trabajo será el estudio de viabilidad de la aplicación de GLP como combustible para motores híbridos en el transporte público. Mediante este estudio se comprobará si es realmente posible la producción de un autobús híbrido impulsado con GLP y las posibles ventajas y desventajas que este supondría respecto a los modelos actuales.

## **2.2. Objetivos específicos**

### **2.2.1. Cálculo del consumo de combustible**

Como hemos explicado, los vehículos híbridos, mediante el uso de las diferentes tecnologías que llevan incorporadas, suponen un ahorro en el gasto de combustible total con respecto a los modelos no híbridos. El cálculo de este ahorro es determinante ya que se trata de un factor importante en la inversión económica necesaria para el uso del autobús.

### **2.2.2. Cálculo de emisiones**

La reducción en el uso de combustible al tener una funcionalidad híbrida del vehículo lleva consigo una disminución de las emisiones a la atmósfera con respecto al resto de vehículos. Esto unido al hecho de que el combustible usado sea GLP, el cual tiene como producto de su combustión menos agentes contaminantes que los combustibles utilizados usualmente, harán posible que la emisión de contaminantes se reduzca en gran medida. Será necesario por tanto cuantificar dicha reducción y su impacto sobre el medio ambiente.

### **2.2.3. Viabilidad económica**

Se indagará en los costes tanto de producción y adaptación, así como en los gastos energéticos a lo largo de la vida útil de este autobús, y se realizará una comparación de estos con los autobuses estándar actualmente en uso. Mediante esta comparación podremos determinar el ahorro o coste extra que la implantación de este nuevo modelo supondrá.

#### **2.2.4. Viabilidad técnica**

En cuanto a la viabilidad técnica, se estudiará la posibilidad física, dentro de las tecnologías y medios existentes, de la producción de este tipo de autobuses híbridos y las posibles limitaciones o ventajas que encontraremos, así como la potencia suministrada o los cambios necesarios de adaptación.

### **3. Desarrollo**

### **3.1. Autobuses**

Para que sea posible cuantificar las diferencias entre los autobuses actuales y la propuesta de una disposición híbrida con GLP como combustible, se debe escoger una referencia. Esta referencia debe ser un modelo de autobús estándar, de características lo más parecidas a los autobuses urbanos más utilizados en las ciudades.

También es necesario diferenciar los cambios obtenidos por la aplicación de la disposición híbrida del autobús respecto a los autobuses impulsados únicamente con un MCI, de los cambios conseguidos por el empleo de gases licuados de petróleo como combustible respecto a los dos anteriores. De esta manera, se puede relacionar cada cambio que se realice con las consecuencias que este acarrea.

Por esta razón, se escogen dos modelos de referencia. El primer modelo es un autobús impulsado con un MCI que use gasóleo como combustible, es decir, que tenga un motor basado en el ciclo Diesel. Se ha seleccionado este tipo de motores ya que los motores diésel son los más usados en el sector de transporte de pasajeros con autobuses, ocupando casi en su totalidad el mercado. Como segundo modelo se ha seleccionado un autobús híbrido eléctrico, con gasóleo también como combustible en el MCI, ya que los modelos existentes de híbridos en autobuses utilizan también en su gran mayoría motores de combustión diésel.

#### **3.1.1. Autobús diésel**

Para el autobús convencional impulsado con diésel se ha escogido un autobús de la empresa MAN. El modelo escogido ha sido el Lion's City con una disposición del motor vertical. La selección de este autobús se basa en sus características técnicas, tanto de dimensiones como del motor, las cuales se sitúan en la media de los autobuses urbanos utilizados de forma habitual.



Figura 12: Dibujo del Lion's City

Se trata de un autobús urbano de suelo bajo, creado así para facilitar la entrada de pasajeros y especialmente los pasajeros con algún tipo de minusvalía en un ámbito urbano donde la

Dimensions/Weights		Lion's City (vertical arrangement)
Vehicle dimensions*	Length/Width/Overall height	11,980 mm/2,500 mm/2,880 mm
	Wheelbase/Clearance circle	5,875 mm/22,180 mm
Interior equipment	Seating arrangement	max. 36/70
Running gear	ZF EcoLife Step3	6-speed automatic
	Voith DIWA6	4-speed automatic
Engine	Diesel	D0836 LOH Euro 6
	Gas	
	Arrangement	6-cylinder in-line engine
	Performance (Diesel )	184 kW/250 hp, 213 kW/290 hp
	Performance (Gas)	
	Capacity (Diesel)	6,871 cm <sup>3</sup>
	Capacity (Gas)	
	max.torque (Diesel)	1,000Nm
max.torque (Gas)		
Volume Capacity**	Fuel tank	220/ 290l

Tabla 4: Características técnicas del Lion's City

entrada y salida de estos es constante. La longitud del vehículo es de aproximadamente 12 metros, con una anchura de 2,5 metros y una altura de 2,88 metros.

Este vehículo está impulsado por un motor D0836 LOH Euro 6 el cual cuenta con 6 cilindros en línea, con cuatro válvulas por cada cilindro. De las varias opciones que ofrece el fabricante, se selecciona la variante del motor LOH67, la cual desarrolla 184 Kw, lo que es igual a 250 caballos de potencia. El motor tiene una cilindrada de 6,871cm<sup>3</sup> y desarrolla 1000 Nm de par máximo.

Piston displacement 6.9 liter      bore 108 mm      stroke 125 mm

Emission standard		EURO 6			EEV		
Engine model		LOH67	LOH66	LOH61	LOH60	LOH71	LOH70
Exhaust gas aftertreatment		SCRT®	SCRT®	CRT®	CRT®	PM-KAT®	PM-KAT®
Rated power <sup>1)</sup>	kW	184	213	184	213	184	213
Rated power <sup>1)</sup>	hp	250	290	250	290	250	290
at speed	rpm	2 200	2 200	2 300	2 300	2 300	2 300
Maximum torque	Nm	1 000	1 100	1 000	1 100	1 000	1 100
at speed	of	rpm	rpm	rpm	rpm	rpm	rpm
	up to	rpm	rpm	rpm	rpm	rpm	rpm
Fuel consumption <sup>2)</sup>	g/kWh	200	200	197	197	197	197
Dimensions							
Length	mm	1 198	1 198	1 198	1 198	1 198	1 198
Width	mm	841	841	841	841	841	841
Height	mm	937	937	937	937	937	937
Height of lower edge of oil pan to middle of crankshaft	mm	306	306	306	306	306	306
Weight (dry)	kg	668	668	667	667	667	667

Tabla 5: Características técnicas de modelos del D0836

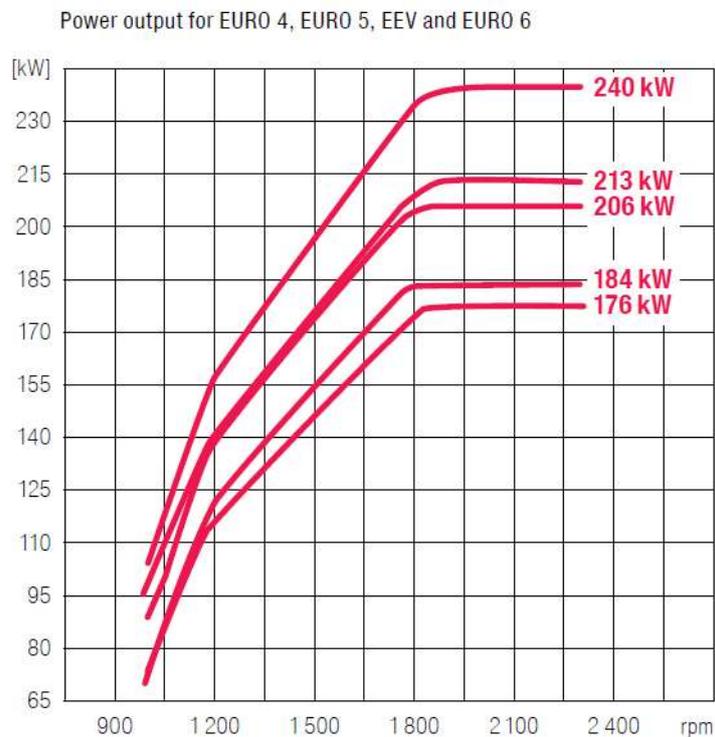


Gráfico 6: Potencia suministrada por diferentes modelos del D0836

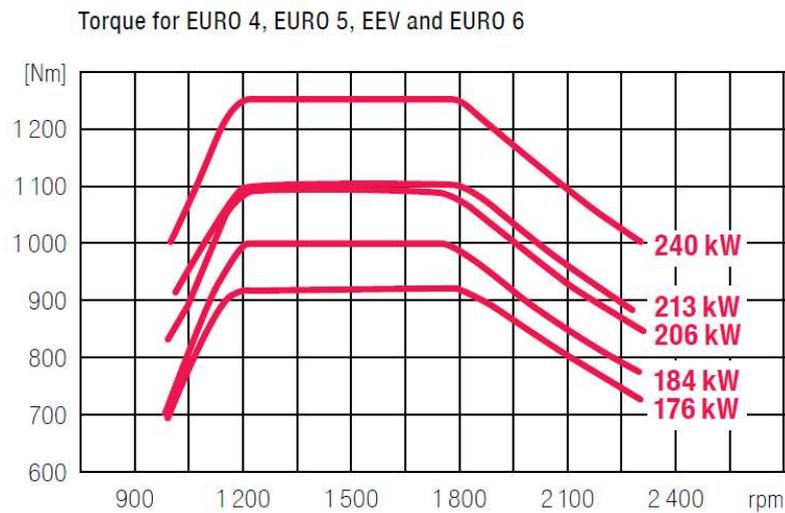


Gráfico 7: Par suministrado por diferentes modelos del D0836

### 3.1.2. Autobús híbrido diésel

Para esta disposición se ha escogido un autobús de la misma empresa, MAN. Se trata del modelo Lion's City Hybrid. Este autobús es un modelo similar al escogido como autobús diésel, pero con la disposición híbrida. La elección de este autobús híbrido se basa en la razón de que al ser autobuses de la misma compañía y similares especificaciones, cuentan con unas características muy parecidas que facilitarán los cálculos y comparación entre ambos.

Se trata de un autobús híbrido no enchufable, que aprovecha la energía de frenado mediante los frenos regenerativos para almacenarla de forma eléctrica y más tarde usarla. La

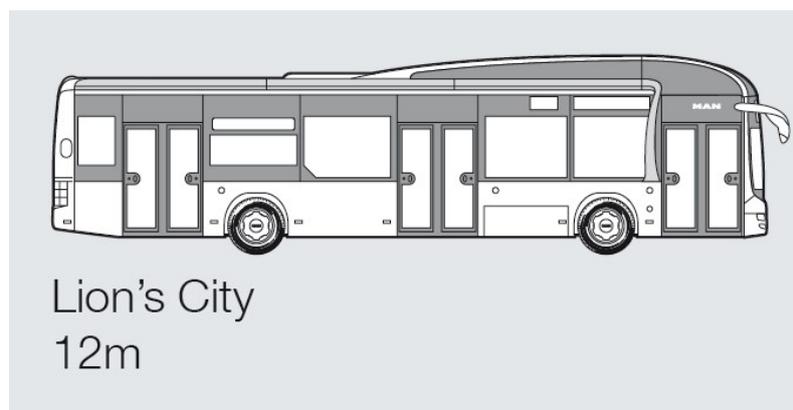


Figura 13: Dibujo del Lion's City Hybrid

disposición del tren propulsor es en serie, con lo cual el MCIA alimenta junto a las baterías el motor eléctrico, el cual se encarga de la propulsión del vehículo.

Sus dimensiones son aproximadamente 12 metros de largo, 2,5 metros de anchura y 3,275 metros de altura. Cuenta con un motor D0836 LUH Euro 6 de seis cilindros en línea. Como podemos observar los dos autobuses, tanto el modelo diésel como el híbrido, cuentan con el mismo motor.

Dimensions/Weights		Lion's City Hybrid (series)
Vehicle dimensions*	Length/Width/Overall height	11,980 mm/2,500 mm/3,275 mm
	Wheelbase/Clearance circle	5,875 mm/22,350 mm
Interior equipment	Seating arrangement	max. 36/36
Running gear	ZF EcoLife Step3	6-speed automatic
	Voith DIWA6	4-speed automatic
Engine	Diesel	D0836 LUH Euro 6
	Gas	Electric synchronous engines 2x 75 kW
	Arrangement	6-cylinder in-line engine
	Performance (Diesel )	184kW/250 hp
	Performance (Gas)	
	Capacity (Diesel)	6,871 cm <sup>3</sup>
	Capacity (Gas)	
	max.torque (Diesel)	1750 U/min
	max.torque (Gas)	
Volume Capacity**	Fuel tank	220 l, 290 l

**Tabla 6: Características técnicas del Lion's City Hybrid**

### 3.1.2.1. Supercondensadores

El Lion's City Hybrid, por el contrario que la gran mayoría de vehículos híbridos, los cuales cuentan con un sistema de almacenamiento de energía eléctrica basado en baterías, como pueden ser de ion de litio, cuenta con un sistema de almacenamiento de energía eléctrica UltraCap. Los UltraCap, conocidos como supercondensadores o ultracondensadores, son unidades de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas. La diferencia de estos con los condensadores usuales es la capacidad de sustentar una densidad eléctrica considerablemente superior. Pueden llegar a tener capacidades del orden de miles de faradios.

Durante los últimos años, los supercondensadores han aparecido como una fuerte alternativa al resto de medios de almacenamiento de energía eléctrica o baterías. La gran ventaja que presentan los supercondensadores respecto a las baterías convencionales es la cantidad de potencia que son capaces de proporcionar, aunque poseen una menor densidad de carga.

Otra ventaja es la rapidez de carga y descarga que poseen, suministrando altas corrientes de carga. Tienen una vida útil de millones de cargas y descargas, pueden operar en ambientes bastante adversos y no poseen elementos tóxicos, a diferencia del resto de baterías utilizadas, las cuales pueden llegar a ser muy contaminantes una vez acabe su vida en funcionamiento.

Como se ha visto, los supercondensadores son elementos adecuados para el uso en vehículos híbridos no enchufables. En estos, son necesarios elementos que suministren altas potencias para poder impulsar al vehículo, y su velocidad de carga facilita el almacenamiento de la energía recogida por los frenos regenerativos. La menor cantidad de energía que son capaces de almacenar podría parecer un inconveniente, pero al tratarse de un híbrido no enchufable, no es necesario almacenar una gran cantidad de energía.

Los supercondensadores con los que el Lion's City Hybrid cuenta pueden suministrar una potencia de hasta 200 Kw, pudiendo recorrer una distancia de hasta 200 metros únicamente con energía eléctrica. Cuando los supercondensadores bajan del 60% de la carga, se activa el motor diésel que alimenta a su vez al motor eléctrico para propulsar el autobús.

### **3.1.3. Autobús híbrido GLP**

Los vehículos impulsados con GLP son usualmente motores de ciclo Otto, que usan gasolina como combustible, sobre los que se ha realizado una serie de modificaciones para que tengan un correcto funcionamiento con GLP como combustible. Debido al funcionamiento del motor con GLP es necesario accionar los motores con gasolina y más tarde, cuando este alcanza una temperatura apta, se inyecta el combustible gaseoso GLP.

Debido a la diferencia de los ciclos Diesel y Otto, no es posible adaptar motores diésel para que funcionen correctamente con GLP. En los motores de ciclo Otto, la combustión de la mezcla se realiza de manera provocada con el uso de las bujías, que accionan una chispa. Debido a las características del GLP, este es el ciclo adecuado para su funcionamiento, ya que en los motores de ciclo Diesel, en los que la combustión de la mezcla se provoca por las condiciones de presión y temperatura necesarias para que esta aparezca, este combustible no es efectivo. Las adaptaciones para convertir un motor que funcione con gasóleo a GLP existen, aunque de una manera minoritaria. Estas adaptaciones, al contrario que las adaptaciones de gasolina a GLP, hacen que el motor sea accionado mediante una mezcla de gasóleo y GLP, con una proporción aproximada de 20% GLP y 80% gasóleo. Esta conversión reduce emisiones en cierto grado, pero no al nivel de un motor accionado únicamente con GLP.

En el mercado actual, prácticamente en su totalidad, se producen autobuses accionados con motores basados en el ciclo Diésel, es decir, que usan gasóleo como combustible. Por lo tanto, para el cálculo del autobús híbrido accionado mediante GLP, se escoge el autobús Lion's City Hybrid, el cual usa gasóleo como combustible, y se supone que este autobús está accionado mediante un motor de ciclo Otto, realizando las aproximaciones necesarias, y adaptando el motor a GLP, para así poder calcular la prestaciones que este podría aportarnos.

### 3.1.3.1. Motor de ciclo Otto

Para la oportuna sustitución que se realiza del motor de ciclo Diesel, el cual impulsa al Lion's City y al Lion's City Hybrid, por un motor de ciclo Otto para su siguiente adaptación a GLP, se debe seleccionar un motor lo más similar posible al motor actual, que suministre un par y potencia adecuados para accionar el generador eléctrico que acciona la propulsión de las ruedas.

Se opta por el motor E0836 LOH05 Euro 6, de la empresa MAN, al igual que los motores anteriores. Se trata de un motor de ciclo Otto de 4 tiempos, de 6 cilindros en línea con instalación en vertical. Desarrolla una potencia máxima de 184 Kw, lo que es igual a 250 CV, y un par máximo de 850 Nm. Tiene un consumo específico mínimo de 229 g/kWh.

Piston displacement 6.9 liter      bore 108 mm      stroke 125 mm

Emission standard	EURO 6			EEV			
	LOH06	LOH05	LOH04	LOH03	LOH02	LOH01	
Engine model	LOH06	LOH05	LOH04	LOH03	LOH02	LOH01	
Exhaust gas aftertreatment	3-way cat. conv.						
Rated power <sup>1)</sup>	kW	162	184	206	162	184	206
Rated power <sup>1)</sup>	hp	220	250	280	220	250	280
at speed	rpm	2 200	2 200	2 200	2 200	2 200	2 200
Maximum torque	Nm	750	850	1 000	750	850	1 000
at speed	rpm	900–2 000	900–2 000	900–2 000	900–2 000	900–2 000	900–1 900
Fuel consumption <sup>2)</sup>	g/kWh	234	229	228	234	229	228
Dimensions							
Length	mm	1 148	1 148	1 148	1 148	1 148	1 148
Width	mm	808	808	808	808	808	808
Height	mm	934	934	934	934	934	934
Height of lower edge of oil pan to middle of crankshaft	mm	309	309	309	309	309	309
Weight (dry)	kg	590	590	590	590	590	590

1) Rated power in accordance with ISO 1585 89/491 EEC

2) Minimum specific fuel consumption

Tabla 7: Características técnicas de modelos del E0836

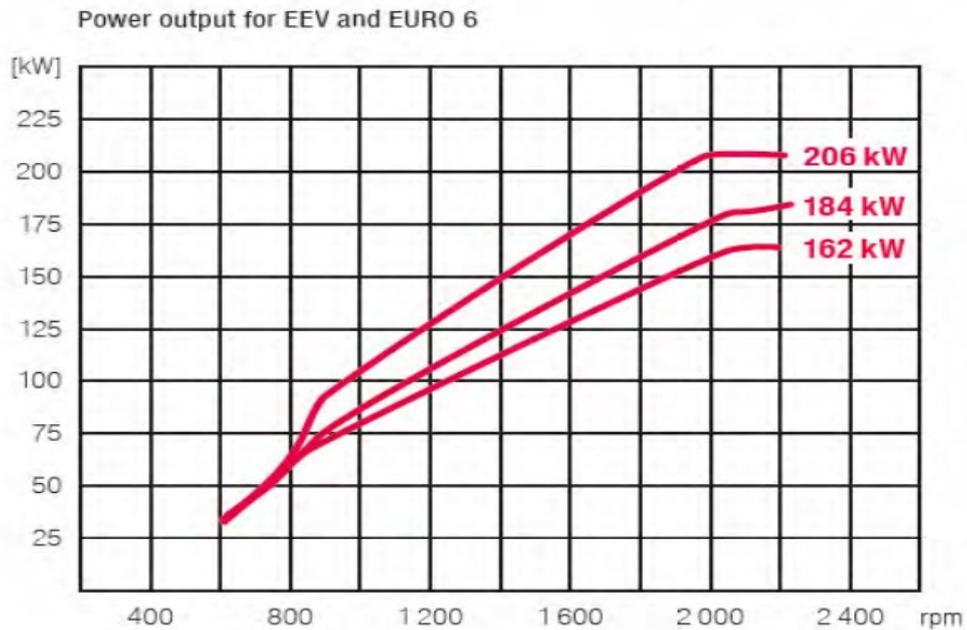


Gráfico 8: Potencia suministrada por diferentes modelos del E0836



Gráfico 9: Par suministrado por diferentes modelos del E0836

Como se puede observar comparando ambos motores, el motor E0836 desarrolla la misma potencia máxima que el D0836; por otra parte este tiene una ligera disminución del par máximo, ambos en un número de revoluciones por minuto similar, a la par que un aumento en

el consumo de combustible. Las dimensiones son muy similares también, por lo que su sustitución no es un inconveniente, y las prestaciones de ambos motores son muy similares.

### 3.1.3.2. Adaptación a GLP

La adaptación de un motor a GLP requiere la instalación de una serie de accesorios que nos permitan usar este combustible, aparte de la gasolina que necesitamos para arrancar y poner a punto el motor. Estos son los accesorios que necesitaremos para dicha adaptación.

#### 3.1.3.2.1. Depósito

La adaptación requiere de un depósito adicional al depósito de gasolina donde almacenar el GLP dispuesto a su inyección. Existen diferentes tipos de depósito de almacenamiento, los más usados son:

Depósito toroidal



Figura 14: Depósito toroidal

Depósito cilíndrico



Figura 15: Depósito cilíndrico

### 3.1.3.2.2. Boca de carga

Se trata de la boca por donde repostaremos el combustible cuando sea necesario. Su instalación se realiza en el hueco existente para la boca de carga de la gasolina o, si no existiera el espacio suficiente, en el lateral del vehículo, creando un hueco nuevo.



**Figura 16: Boca de carga**

### 3.1.3.2.3. Tubería GLP

Es el conducto por el cual fluirá el GLP, concretamente está conectada desde el depósito a la electroválvula de corte.



**Figura 17: Tubería GLP**

#### 3.1.3.2.4. Electroválvula de corte

Las electroválvulas son válvulas que controlan el caudal de un fluido por medio de un electroimán. En el caso de los vehículos impulsados con GLP, esta válvula está ensamblada con el reductor, e interrumpe el flujo del combustible cuando se interrumpe el encendido, el motor se para, se detecta un paso descontrolado de combustible o se selecciona el accionamiento del motor mediante gasolina.



Figura 18: Electroválvula de corte

#### 3.1.3.2.5. Válvula antiretorno

Se trata de una válvula que facilita la entrada de GLP durante la carga impidiendo la salida de este al exterior.



Figura 19: Válvula antiretorno

#### 3.1.3.2.6. Válvula de corte al 80%

Esta válvula corta el paso de combustible durante la carga cuando en el depósito se ha alcanzado el 80% de carga en estado líquido. Permite de esta manera el posible aumento de la presión en el depósito, dentro de unos límites, debido a factores externos como puede ser la subida de temperatura debida a un fuego cercano.

#### 3.1.3.2.7. Válvula de sobrepresión

Libera combustible cuando el depósito alcanza una presión determinada, previamente establecida, por razones de seguridad.



**Figura 20: Válvula de sobrepresión**

#### 3.1.3.2.8. Válvula termofusible

Libera combustible cuando se alcanza una temperatura determinada por razones de seguridad. Usualmente coincide y comparte función con la válvula de sobrepresión.

#### 3.1.3.2.9. Flotador

Este accesorio nos permite medir el nivel de combustible líquido que se posee en el depósito. Gracias a esto se puede cortar la carga cuando se alcanza el 80%, o se puede saber cuándo es necesario el repostaje.



Figura 21: Flotador

#### 3.1.3.2.10. Multiválvula

Está instalada en el depósito y de forma habitual incluye todas las válvulas anteriormente nombradas, así como el flotador para medir el nivel de combustible. Se trata de otra forma de instalación conjunta de dichas válvulas.



Figura 22: Multiválvula

#### 3.1.3.2.11. Sensor de temperatura

Este sensor de temperatura se sitúa en el motor y permite saber el momento, dependiendo de la temperatura del motor, en el que se puede comenzar la inyección de GLP en el motor.



Figura 23: Sensor de temperatura

#### 3.1.3.2.12. Caja estanca

Es un elemento de seguridad importante en las instalaciones de GLP en vehículos que realiza la función de estanqueidad del depósito respecto al interior del vehículo, desviando la salida de gases provocada por fugas en el depósito hacia el exterior del vehículo e impidiendo así la combustión de estos gases dentro del mismo.



Figura 24: Caja estanca para depósito cilíndrico

### 3.1.3.2.13. Reductor-vaporizador

Este accesorio baja y estabiliza la presión del gas a los niveles necesarios para que el funcionamiento del motor sea el correcto. Es en este punto donde el combustible pasa de fase líquida, como se almacena en el depósito, a gaseosa, necesaria para ser inyectada en el cilindro.



**Figura 25: Reductor-vaporizador**

### 3.1.3.2.14. Inyectores

Inyectan el GLP a los colectores de admisión, donde luego pasarán directamente al cilindro para su combustión, de una forma y con una cantidad precisa.



**Figura 26: Inyectores para GLP**

#### 3.1.3.2.15. Bujías

La combustión del GLP es sensiblemente diferente a la de la gasolina, es por esto que es necesario instalar un tipo de bujías adecuadas. La mezcla aire-combustible es más difícil de encender, por lo que la tensión de encendido debe ser mayor, con el consecuente peligro de que las bobinas se deterioren.



Figura 27: Bujía para GLP

#### 3.1.3.2.16. Centralita

La centralita, o unidad de control electrónico, mediante los datos recibidos de los diferentes componentes, gestiona el sistema garantizando el buen funcionamiento del vehículo. Concretamente, controla el dosado, es decir, relación aire/ combustible que se inyecta, así como la cantidad de este y la secuencia de inyección.



Figura 28: Centralita

### 3.1.3.2.17. Conmutador

Este mando de control se instala en el salpicadero del vehículo y permite cambiar el combustible utilizado de gasolina a GLP y viceversa, así como ver cuál de los dos se está usando, la cantidad de combustible GLP que se tiene en el depósito o la posible existencia de un problema en el sistema.



Figura 29: Conmutador

## 3.2. Consumo de combustible

El consumo del motor permite calcular la cantidad de combustible que se utiliza para alimentar el motor en un tiempo, a una potencia determinada. Este dato es necesario para poder calcular las emisiones que este expulsará a la atmósfera, así como la inversión económica necesaria de combustible a lo largo de la vida útil del autobús.

El consumo específico de combustible del diésel y del híbrido es el mismo, al tratarse del mismo motor. No obstante, en el autobús híbrido, al aprovecharse la energía cinética de las frenadas mediante los frenos regenerativos, el consumo de combustible del motor será menor. Por otra parte, al ser una disposición del tren propulsor en serie y no estar acoplado el motor diésel directamente a la transmisión, sino que alimenta al motor eléctrico, el motor de combustión trabaja en un régimen óptimo, y así se reduce aún más el consumo del mismo.

El consumo específico mínimo del motor D0836 LOH67 Euro 6, el cual impulsa al autobús impulsado por gasóleo y el híbrido con gasóleo, es de 200 g/kWh. Por otra parte el consumo del E0836 LOH04 Euro 6 es de 229 g/kWh.

Para el cálculo del consumo total de combustible para cada autobús, es necesario tener en cuenta varios factores y cuantificar variables que desempeñarán un papel importante en el mismo y que se detallarán a continuación.

### **3.2.1. Vida útil**

Cuando se habla de vida útil de un autobús hace referencia, al periodo de tiempo durante el cual este cumplirá con su función de una forma adecuada y que, alcanzado este momento, sea más económico o recomendable la retirada que el arreglo. Es necesario definir la vida útil de nuestros modelos, con el fin de poder realizar el cálculo total de contaminantes que expulsará al exterior durante este periodo, así como de los costes económicos y la viabilidad de la inversión. La vida útil de un autobús urbano puede variar según los cuidados que se le den y factores externos que puedan afectarle.

### **3.2.2. Vida útil autobús diésel**

El Ministerio de Fomento, en un observatorio de los costes del transporte de viajeros en autocar publicado en 2013, determinaba la vida útil de un autobús estándar en 10 años, realizando trayectos de 75.000 km al año. Esto hace un total de 750.000 de kilómetros recorridos durante toda su vida. Se tomará este dato como referencia a la vida útil del autobús sobre el que se van a realizar los cálculos.

### **3.2.3. Vida útil autobús híbrido diésel**

El principal factor que puede disminuir la vida útil de cualquier vehículo híbrido eléctrico es la vida útil de las baterías. Estas baterías tienen una vida útil normalmente menor que los vehículos en sí, y por lo tanto es necesario cambiarlas en un determinado momento si queremos seguir manteniendo en funcionamiento nuestro vehículo. Aunque el cambio de las baterías no suele ser una gran inversión, llegado este punto cabe analizar si es más recomendable realizar dicha inversión o renovar el vehículo por completo.

Como ya hemos dicho, el Lion's City Hybrid cuenta con supercondensadores en lugar de baterías convencionales. Estos supercondensadores tienen una vida útil superior a las baterías, lo que alargará la vida útil del autobús. La empresa Man asegura que los supercondensadores utilizados para la producción del Lion's City Hybrid tienen una vida útil igual a la del vehículo. Por lo tanto, a efectos de cálculo se tomará la vida útil del autobús híbrido igual a la del autobús diésel convencional, es decir, 10 años realizando 75.000 km anuales, lo que hacen un total de 750.000 km a lo largo de su vida útil.

### 3.2.4. Vida útil autobús híbrido GLP

En lo que respecta a los motores de ciclo Otto adaptados a GLP no se han observado cambios considerables en la vida útil de los mismos. Aunque hay opiniones que difieren al respecto y argumentan, por una parte, que este combustible puede acortar la vida útil del motor por un resecamiento de válvulas y la culata y, por otra, que no solo no reduce su vida útil, sino que puede alargarla por la combustión más limpia respecto a otros combustibles, se considerará que la vida útil será igual a la de los otros modelos.

De esta manera el autobús Lion's City Hybrid adaptado a GLP tiene una vida útil de 10 años realizando 75.000 km al año, al igual que los otros modelos.

### 3.2.2. Tiempo de funcionamiento

Se conoce ya la vida útil del autobús, sin embargo a lo largo de esta, no siempre estará en funcionamiento. Solo lo estará cuando el autobús esté en servicio. Los horarios de servicio de los autobuses urbanos varían con respecto a la ciudad, de manera que se tomará una media de estos horarios para determinar las horas de servicio. Se determinará por lo tanto el horario de servicio desde las 7:00 am hasta las 10:30 pm, un total de 15,5 horas de funcionamiento diario del autobús, lo cual multiplicado por los días de vida útil, da el número total de horas en las que el autobús está en marcha.

#### Tiempo de funcionamiento

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = 15,5 \left( \frac{\text{horas}}{\text{día}} \right) \times 10(\text{años}) \times 365 \left( \frac{\text{días}}{\text{año}} \right) = 56.575 \text{ (horas)}$$

### 3.2.3. Potencia media

La potencia aportada por la ficha técnica del motor determina la potencia máxima que el motor puede suministrar. Esta potencia no es la que el autobús suministra en cada momento del funcionamiento; de hecho esta potencia solo es alcanzada en determinados momentos en que es necesaria, siendo menor la potencia el tiempo restante.

Por esta razón, es necesario determinar una potencia media de funcionamiento, a fin de poder realizar los cálculos necesarios de una forma más precisa.

La potencia media que supondremos que suministra el motor para impulsar al autobús es el 70% de la potencia máxima suministrable. Es un porcentaje bastante aceptable contando con que el autobús es urbano, y por lo tanto no alcanzará grandes velocidades como los autobuses interurbanos, pero, no obstante, realiza muchas paradas, lo que conlleva la posterior puesta en

marcha del vehículo, situándose por lo tanto en un pico de potencia y, por lo tanto, de consumo.

Tomando entonces un 70% de la potencia máxima, el autobús Lion's City accionado por un motor diésel, el cual suministra 184kW de potencia máxima, suministrará de media una potencia de 128,8 kW.

#### **3.2.4. Consumo total del combustible a lo largo de la vida útil**

Una vez que se tiene el combustible específico del motor y el tiempo durante el cual el autobús va a estar trabajando, se puede calcular el consumo de combustible total a la largo de la vida útil del vehículo. Teniendo el consumo específico en g/kWh, y el tiempo durante el cual el autobús va a estar en funcionamiento en horas, así como la potencia media, basta con multiplicar tales factores para conseguir el resultado.

##### **3.2.4.1. Consumo total autobús diésel**

$$\text{Consumo total} = 220 \left( \frac{g}{kWh} \right) \times 128,8 (kW) \times 56.575(h) = 1.457.372.000 (g)$$

Se llega por lo tanto a afirmar que el autobús Lion's City consume a lo largo de su vida útil un total de 1.457.372 kilogramos de combustible gasoil.

##### **3.2.4.2. Consumo total autobús híbrido diésel**

Para el cálculo del consumo del Lion's City Hybrid se deberá realizar otro procedimiento. El fabricante de ambos autobuses, Man, informa de que su autobús puede ahorrar hasta un 30% de consumo respecto a los autobuses convencionales, dependiendo de algunos factores que se pueden ver en la siguiente gráfica.

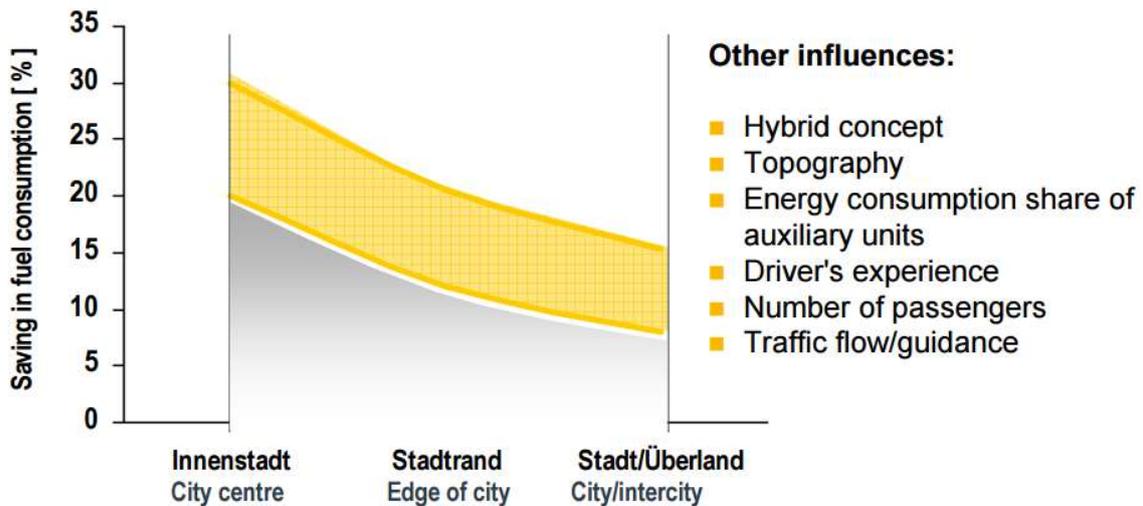


Gráfico 10: Ahorro de combustible con disposición híbrida

Observando la gráfica, se ve cómo el máximo ahorro, que supone un 30% del consumo total, se consigue en el centro de la ciudad, debido al elevado tráfico que se encuentra en esta zona y las consecuentes paradas y arranques. En trayectos interurbanos, este autobús supondría un ahorro de aproximadamente el 15% del consumo del vehículo. El ahorro dependerá, por lo tanto, del trayecto que realice el autobús en su línea regular. Esta gráfica cuenta también con un intervalo en el ahorro según algunos factores que, como se puede ver, son el tipo de concepto híbrido, la topografía o el número de pasajeros entre otros.

Se supone que se trata de un autobús cuyo trayecto es por el núcleo urbano en su totalidad, mayoritariamente situado en el centro de la ciudad, quedando aproximadamente en un 25% de ahorro de combustible. Sabiendo el combustible que consume un autobús estándar, y el porcentaje del ahorro que supone la disposición híbrida, el consumo total durante la vida útil del autobús Lion's City Hybrid quedaría de la siguiente manera.

$$\text{Consumo total} = 1.457.372.000 \text{ (g)} \times 0,75 = 1.093.029.000 \text{ (g)}$$

El combustible total que consume el autobús híbrido es de 1.093.029 kg de gasoil. Esto, con respecto al autobús accionado con un motor diésel, supone un ahorro de 364.343 Kg de combustible.

### 3.2.4.3. Consumo total autobús híbrido GLP

Puesto que el autobús híbrido con GLP lleva instalado un motor diferente a los dos modelos anteriores y, por lo tanto, tiene un consumo específico diferente, se debe partir desde otros

datos para el cálculo del consumo de combustible total. Con el fin de realizar dicho cálculo se ejecuta el mismo procedimiento que con el autobús híbrido con gasóleo, suponiendo un autobús accionado con el motor E0836 que acciona al autobús híbrido, pero con una disposición convencional, es decir, accionado simplemente con el motor de combustión y sin una fuente adicional de energía eléctrica.

Este motor tiene una potencia máxima de 184 kW y un consumo específico de 229 g/kWh. Suponiendo, tal y como se ha realizado anteriormente, una potencia media del 70%, lo que es igual a 128,8kW, y un tiempo de funcionamiento de 56.575 horas, el cálculo del consumo total del autobús accionado únicamente con GLP se realizaría de la siguiente forma.

$$\text{Consumo total} = 229 \left( \frac{g}{kWh} \right) \times 128,8 (kW) \times 56.575 (h) = 1.688.690.940 (g)$$

Ahora, si se tiene en cuenta la disposición híbrida del autobús, así como los datos de ahorro de combustible proporcionados por MAN, que se fijaron en un 25%, se pasa a calcular el consumo total del autobús híbrido con GLP.

$$\text{Consumo total} = 1.688.690.940 (g) \times 0,75 = 1.251.518.205 (g)$$

Así se puede ver que el autobús híbrido accionado con GLP consume durante su vida útil un total de 1.251.518,205 kg de GLP.

### 3.3. Emisiones

El cálculo práctico de emisiones de un vehículo se realiza de forma relativamente sencilla. Basta con analizar los gases de escape del vehículo a estudiar para conocer los componentes que este ha expulsado y su cantidad. Se trata de un proceso estandarizado muy recurrente.

Por otro lado, si se pretende realizar un cálculo teórico de las emisiones, el proceso se vuelve más complejo y se basará en las características del combustible y en datos adquiridos de forma empírica. Este cálculo se realiza mediante el uso de los llamados factores de emisión. Estos factores son calculados en base a pruebas sobre diferentes tipos de vehículos y realizando una media, e indican la cantidad de cada producto emitido procedente de la oxidación del combustible a estudiar, con relación a una unidad conocida. Para escoger los factores de emisión adecuados es necesario tener en cuenta el combustible usado, así como el tipo de vehículo en el que se va a usar, la antigüedad de este y el escape instalado en el mismo, entre otros factores.

Los factores de emisión pueden clasificarse en dos tipos: los calculados en base a la cantidad de combustible utilizado en kilogramos y los calculados en base a la distancia recorrida por el vehículo en kilómetros, ambos calculados siguiendo diferentes métodos. La diferencia entre ambos factores de emisión radica en que cada uno proporciona con mayor exactitud la cantidad de emisiones de un grupo de contaminantes; es decir, para el cálculo de cada contaminante es más exacto un factor de emisión que el otro. No obstante, como se debe partir de la misma base de cálculo para obtener resultados más precisos, y puesto que se cuenta con la cantidad de combustible usado por cada uno de los autobuses durante el periodo de su vida útil, este cálculo se realizará en base a los factores de emisión por consumo de combustible.

Los factores de emisión necesarios para realizar el cálculo son el de gasóleo y GLP usado por autobuses. Los factores de emisión para autobuses que utilizan gasóleo están calculados; sin embargo, no se ha encontrado factores de emisión para autobuses con GLP como combustible. Esto se debe a que, aunque el GLP tenga un uso extendido entre turismos, no lo tiene en el ámbito del transporte público, aunque sí encontremos modelos de transporte público que operen con GLP. Por lo tanto, sí que están calculados los factores de emisión de GLP y gasóleo para turismos. De esta manera, el procedimiento a seguir es extrapolar los factores de emisión de GLP para turismos, conociendo las emisiones de gasóleo para autobuses y turismos, para obtener las emisiones de GLP para autobuses.

Se emplean factores de La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Esta organización ha calculado los factores de emisión mediante el software de cálculo de emisiones COPERT. Este software, desarrollado por la propia organización, está creado para calcular las emisiones nacionales debidas al transporte en base al parque de vehículos del país, aunque es aplicable según dicen a cualquier estudio científico de cálculo de emisiones.

En este software se introducen una serie de variables relacionadas con el parque de vehículos del país (tipo de vehículos, cantidad, antigüedad, combustible usado...), así como otras variables propias del país (temperatura media mensual, RVP del combustible, cantidad de azufre...) y da como resultado los distintos tipos de emisiones totales que serán expulsadas a la atmósfera.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), publicó en septiembre de 2016 la “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook”, una guía para el cálculo de emisiones de un país según diferentes sectores (industria, transporte por carretera, aviación...) y en cuya

metodología se basa COPERT. Esta guía incluye en el apartado de transporte de carretera una serie de factores de emisión clasificados según tipo de vehículo, combustible utilizado, normativa aplicada, etc.

Dentro de los factores de emisión publicados podemos encontrar una serie de factores que no están encuadrados dentro de la propia combustión de los hidrocarburos dentro del motor y posterior reacción catalítica antes del escape. Estos factores de emisión tienen en cuenta la abrasión del pavimento, el desgaste de los frenos o la evaporación del combustible. Son factores muy a tener en cuenta en estudios de emisiones totales de vehículos, así como en investigaciones con el objetivo de la reducción de estas. No obstante, puesto que en este estudio solo se pretende calcular y comparar las emisiones de diferentes autobuses en base a la disposición de su tren propulsor y el combustible utilizado, y contando con que esto no influye de una forma considerable sobre el desgaste del pavimento o de los frenos, así como que todos los modelos analizados en este estudio tendrán unas emisiones de este tipo similares, se prescindirá del cálculo de estas emisiones y se obviarán los factores de emisión correspondientes.

En la siguiente tabla se detallan los factores de emisión utilizados para el cálculo de las emisiones totales de los autobuses. Constan también los factores de emisión de los turismos con los dos combustibles a estudiar para que quede reflejada la procedencia de la extrapolación. Todos los valores en g contaminante / kg de combustible utilizado.

	Combustible	NO <sub>x</sub> (g/Kg)	COVNM (g/Kg)	CO (g/Kg)	CO <sub>2</sub> (g/Kg)	N <sub>2</sub> O (g/Kg)	NH <sub>3</sub> (g/Kg)
Turismo	Gasóleo	11,20	0,41	2,05	3,14	0,04	0,02
	GLP	4,18	6,10	38,7	3,02	0,02	0,02
Autobús	Gasóleo	28,34	1,33	5,73	3,14	0,03	0,01
	GLP	10,58	19,79	108,17	3,02	0,02	0,01

Tabla 8: Factores de emisión 1

	Combustible	PST <sup>(1)</sup> (g/Kg)	I(1,2,3-cd)p <sup>(2)</sup> (g/Kg)	B(k)f <sup>(3)</sup> (g/Kg)	B(b)f <sup>(4)</sup> (g/Kg)	B(a)p <sup>(5)</sup> (g/Kg)
Turismo	Gasóleo	0,8	4,05e-5	4,58e-5	5,26e-5	4,55e-5
	GLP	0	2e-7	2e-7	0	2e-7
Autobús	Gasóleo	0,61	8,6e-6	3,72e-5	3,33e-5	5,5e-6
	GLP	0	4,25e-8	1,62e-7	0	2,42e-8

Tabla 9: Factores de emisión 2

(1) Partículas en suspensión totales

(2) Indeno (1, 2,3-cd) pireno

(3) Benzo (k) fluorateno

(4) Benzo (b) fluorateno

(5) Benzo(a) pirona

Teniendo el valor de los factores de emisión necesarios para cada contaminante, y el consumo de cada autobús durante el periodo de su vida útil, basta con multiplicarlos para obtener el valor de la masa de cada contaminante emitido a la atmósfera por cada autobús.

	NO <sub>x</sub> (Kg)	COVNM (Kg)	CO (Kg)	CO <sub>2</sub> (Kg)	N <sub>2</sub> O (Kg)	NH <sub>3</sub> (Kg)
Autobús diésel	41.301,92	1.938,30	8.350,74	4.576,15	43,72	14,57
Autobús híbrido diésel	30.976,44	1.453,73	6.263,06	3.432,11	32,79	10,93
Autobús híbrido GLP	13.237,17	24.764,80	135.378,25	3.775,83	20,48	11,47

Tabla 10: Masa total de contaminantes emitidos 1

	PST (Kg)	I(1,2,3-cd)p (Kg)	B(k)f (Kg)	B(b)f (Kg)	B(a)p (Kg)
Autobús diésel	889,00	0,01253	0,05421	0,04853	0,00802
Autobús híbrido diésel	666,75	0,0094	0,04066	0,0364	0,00601
Autobús híbrido GLP	0	0,00005	0,0002	0	0,00003

Tabla 11: Masa total de contaminantes emitidos 2

Ya se tienen los valores totales de la masa de contaminantes expulsados a la atmósfera durante la vida útil. Para una mejor comprensión de los datos, y facilitar su asimilación, se normalizan los valores de las emisiones respecto a las emisiones del autobús diésel convencional.

	NO <sub>x</sub>	COVNM	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>
Autobús diésel	1	1	1	1	1	1
Autobús híbrido diésel	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Autobús híbrido GLP	0,32	12,78	16,21	0,83	0,47	0,79

Tabla 12: Emisiones de contaminantes normalizadas 1

	PST	I(1,2,3-cd)p	B(k)f	B(b)f	B(a)p
Autobús diésel	1	1	1	1	1
Autobús híbrido diésel	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Autobús híbrido GLP	0	0,00424	0,00375	0	0,00377

Tabla 13: Emisiones de contaminantes normalizadas 2

En estas tablas queda reflejado que la disminución de emisiones en el autobús híbrido diésel respecto al diésel convencional están únicamente basadas en la disminución del combustible utilizado, el cual era del 25%. Por lo tanto en todos los contaminantes emite un 25% menos, o lo que es lo mismo, un 75% de las emisiones del diésel convencional. Por otra parte se ve la relación de las emisiones del GLP respecto al diésel convencional de una forma mucho más visual.

El siguiente paso a realizar es analizar las variaciones en las emisiones de cada autobús según cada contaminante para poder determinar las diferencias entre los combustibles, así como entre los distintos métodos de propulsión.

### **3.3.1. Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Este contaminante es el más característico de los motores que operan con gasóleo. Debido a las altas temperaturas y presiones alcanzadas en los cilindros de estos motores, necesarias para su buen funcionamiento, el nitrógeno del aire reacciona con el oxígeno formando estos compuestos. Este hecho es fácilmente comprobable comparando los factores de emisión de este contaminante, en los que se constata una reducción importante en el GLP.

Se produce por lo tanto una merma en la emisión de óxidos de nitrógeno de 10.325,48 kilogramos con una disposición híbrida. En lo que al GLP corresponde, esta disminución es de 28.064,75 kilogramos de contaminante, lo que se traduce en 17.739,27 kilogramos entre las dos disposiciones híbridas.

La reducción de este contaminante simplemente con el uso de un vehículo de propulsión híbrida es positiva, pero es realmente el uso de los GLP como combustible lo que crea una gran diferencia entre estos. Esta reducción es considerable, como se puede ver a simple vista, y constituye uno de los factores más importantes a tener en cuenta para la elección del tipo de combustible a utilizar, ya que minimiza al máximo la emisión de los óxidos de nitrógeno y sus consecuencias en el medio ambiente.

### **3.3.2. Compuestos orgánicos volátiles a excepción del metano (COVNM)**

La reducción con el uso de disposición híbrida de estos contaminantes es de 484,57 kg. Por otra parte, con el uso de GLP se aumenta 22.826,5 kg con respecto al autobús convencional, 22341,93 kg con respecto al híbrido diésel. Es uno de los contaminantes cuyas emisiones aumentamos con el uso de este combustible y, por lo tanto, a tener en cuenta.

### 3.3.3. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas altamente tóxico, y por lo tanto que se debe tener muy en cuenta en los estudios de emisiones. Se puede observar que el GLP no solo disminuye las emisiones de este contaminante, sino que las aumenta considerablemente, lo que resulta un problema a la hora de elegir este combustible alternativo.

El autobús diésel con disposición híbrida reduce en 2.807,68 kilogramos las emisiones de este compuesto con respecto al diésel convencional. No obstante, el autobús híbrido GLP aumenta en 127.027,51 kilogramos las emisiones de monóxido de carbono. Es un aumento notable de las emisiones y será un gran punto en contra del uso de este combustible.

### 3.3.4. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

El factor de emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dado está calculado en base a la proporción de carbono que tiene el combustible. Esto se realiza de tal manera ya que se supone la oxidación completa de este, es decir, una combustión ideal. Aunque la combustión en el cilindro de un motor real no ocurre de esta manera y el carbono reacciona con otros compuestos, o incluso hay parte del combustible que no se oxida debido a diferentes factores, es una forma fácil de calcularlo para su comparación con otros combustibles.

Debido a esta manera de calcular las emisiones del contaminante, el factor de emisión del CO<sub>2</sub> es intrínseco al combustible y no depende de las tecnologías de cada vehículo u otros factores externos, como sí ocurre con el resto de factores.

Comparando los factores de emisión del gasóleo y del GLP, se observa que este último emitirá menos cantidad de CO<sub>2</sub> que el gasóleo, debido a la proporción de carbono que contiene. No obstante, no se debe olvidar que los consumos de ambos motores son diferentes, siendo superior el consumo del motor operante con GLP. Por lo tanto con la disposición híbrida del autobús con motor tipo diésel se reduce en 1.144,04 kilogramos con respecto a la disposición convencional, una reducción notable.

Por otro lado, la reducción de CO<sub>2</sub> por parte del modelo híbrido con GLP es de 800,32 kilogramos. Aunque también se produce una disminución con respecto a la disposición convencional, debido a la reducción del consumo, si se comparan los dos autobuses con una propulsión híbrida, existe un aumento de 343,72 kilogramos en el propulsado con GLP con relación al diésel. Esto se debe al aumento de consumo explicado con anterioridad.

### 3.3.5. Óxido Nitroso ( $N_2O$ )

Las emisiones de óxido nitroso son menores que las emisiones de compuestos vistos anteriormente, no obstante, las emisiones de este contaminante también son reducidas por el uso de GLP.

La diferencia entre el autobús híbrido diésel y el diésel convencional es de 10,93 kilogramos, mientras que con el uso de GLP se consiguen reducir 12,31 kilogramos adicionales.

### 3.3.6. Amoníaco ( $NH_3$ )

El amoníaco es otro contaminante que, aun teniendo emisiones proporcionalmente mucho menores que las principales, van a ser aumentadas por el uso del GLP. Con el autobús convencional se emiten 14,57 kilogramos de amoníaco, reduciéndolo hasta 10,93 kilogramos por el uso de una disposición híbrida. No obstante con el uso del GLP, este aumenta a los 11,47. Como se puede, ver este aumento no es desproporcionado.

### 3.3.7. Partículas en suspensión

Con las partículas emitidas con el GLP si que se encuentra una gran mejora con respecto al diésel. Al ser este combustible gaseoso, en contra del uso en estado líquido del diésel, la combustión de este se realiza de forma mucho más limpia y completa, bajando la emisión de partículas hasta reducirla por completo, como se puede observar en los factores de emisión.

La emisión de partículas por parte del autobús diésel convencional es de 889 kilogramos a lo largo de su vida útil. La reducción por el uso de la disposición híbrida es de 222,25 kilogramos, quedándose así en 666,75 kilogramos. Por último, como se ha dicho, la emisión de partículas por parte del autobús híbrido con GLP es nula, reduciendo así por completo las emisiones de este contaminante.

### 3.3.8. Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos son muy reducidas en relación al resto de contaminantes. En este trabajo se ha tenido en cuenta cuatro tipos de hidrocarburos dentro de este grupo de contaminantes, Indeno (1, 2,3-cd) pireno, Benzo (k) fluoranteno, Benzo (b) fluorateno y Benzo(a) pirona, pero en este apartado se reflejará como la suma del conjunto.

Durante su vida útil el autobús diésel emite 123,29 gramos de estos hidrocarburos, bajando en el autobús híbrido diésel hasta los 92,47 gramos. Por su parte el autobús híbrido GLP emite 0,29 gramos que, como vemos, es una cifra prácticamente nula.

### 3.3.9. Análisis de las emisiones

Como se puede observar, hay diversidad en cuanto a la variación de las emisiones de los autobuses. La fluctuación observada del autobús convencional respecto al híbrido diésel es constante y debida a la disminución en el consumo de combustible. Por otra parte cuando se compara el híbrido diésel con el híbrido GLP es cuando se observa la disparidad. El aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> como consecuencia del aumento del consumo, o del amoníaco, es negativo, pero a su vez admisible. Por otra parte se tiene al CO o a los COVNM, los cuales aumentan considerablemente respecto al gasóleo. Pese a este aumento, ambos compuestos son fácilmente tratables con un convertidor catalítico adecuado, que produzca una oxidación de ambos para reducir sus emisiones.

Teniendo en cuenta estas variaciones negativas, y sus posibles soluciones, cabe considerar que estas son tolerables con el fin de disminuir la emisión de NO<sub>x</sub>, contaminante muy perjudicial y emitido en grandes dosis por los motores que operan con gasóleo, así como del N<sub>2</sub>O y de eliminar la emisión de partículas.

## 3.4. Viabilidad económica

En este apartado se analizarán los costes de cada autobús a lo largo de su vida útil. No solo se tendrá en cuenta por tanto el precio de compra de cada autobús, sino también el precio del combustible que consumirá a lo largo de su vida.

### 3.4.1. Precio del autobús

El precio de los autobuses urbanos es variable dependiendo del modelo y las características del mismo, así como del fabricante. Los autobuses híbridos por su parte, tienen usualmente un precio de venta superior al de los autobuses estándar, debido a las modificaciones que tienen, así como los componentes añadidos como son las baterías (o supercondensadores en nuestro caso), los generadores y toda la distribución eléctrica en general.

Los precios de los autobuses fueron proporcionados por Man, el fabricante, siendo estos una aproximación que puede variar dependiendo de especificaciones pedidas por el cliente como pueden ser tipos de butacas, sistema de ayuda a la explotación (SAE), letreros de línea, tipos de rampa, así como de periodos de garantía, contratos de mantenimiento y reparación, etc. No obstante, se selecciona una configuración estándar de los autobuses con 3 años de garantía total o 300.000 km

#### 3.4.1.1. Precio del Lion's City

El precio del Lion's City con las especificaciones anteriormente comentadas es de 250.000 €, aproximadamente.

#### 3.4.1.2. Precio del Lion's City Hybrid (Gasóleo)

El precio del Lion's City Hybrid es de 350.000 €.

#### 3.4.1.3. Precio del Lion's City Hybrid (GLP)

Para el cálculo del coste del autobús híbrido con GLP como combustible se deberá añadir al precio del autobús híbrido, el precio de adaptación a GLP, el cual consta del precio de todos los accesorios más la mano de obra necesaria para toda la instalación.

##### 3.4.1.3.1. Precio de la adaptación

Los presupuestos de la adaptación a GLP son fácilmente encontrados tanto en internet como en talleres especializados. Se procede a preguntar a un taller especializado localizado en Alcoy, Sebas Automoción, el cual cordialmente proporciona los datos de la adaptación además de alguna especificación técnica. El precio de la adaptación suele ser cerrado según el número de cilindros del motor. En este caso de un motor de seis cilindros, el precio es de 1.950 € + IVA, lo que sería un total de 2.359,5 €.

No obstante, con el propósito de justificar este precio, se realiza un listado de las piezas necesarias para esta adaptación, anteriormente mencionadas y descritas, con su precio de mercado.

- **Depósito:** Se ha escogido un depósito toroidal de 76L. Sus medidas son 650mm de diámetro y 270mm de altura. Vienen incluidas con el depósito la válvula de corte o de servicio, válvula de alivio de presión, válvula de llenado al 80% y flotador, así como la caja estanca necesaria para su instalación. Precio: 500€.
- **Boca de carga:** Se escoge una boca de carga estándar, cuyo precio es de 30€.
- **Tubería GLP:** Teniendo en cuenta que tanto el motor como el depósito van instalados en la parte trasera del autobús, y que las conexiones de GLP van desde la boca de carga al depósito, y desde el depósito a la inyección al motor, se estima que la longitud del cable será el doble del ancho del autobús, siendo así la longitud de 5 metros de tubo. El precio del tubo para instalaciones de GLP en el mercado ronda los 3,5€ por metro, siendo así el precio final de 17,5€.
- **Válvula antirretorno:** El precio medio del mercado de este tipo de válvulas es de 40€.

- **Sensor de temperatura:** Se escoge un sensor de temperatura Landi de 16 mm de diámetro, cuyo precio es de 20€.
- **Reductor-Vaporizador:** Se escoge un vaporizador de 1,4 bar de una potencia de 280kw. El precio de este vaporizador es de 220€.
- **Inyectores:** Seis inyectores Landi Renzo RGI MED grandes, con un precio de 58,44 €, lo que hace un total de 350,64 €.
- **Bujías:** Seis bujías de encendido NGK 1516 con un precio de 13,39€ cada una, llegando al total de 80,34€.
- **Centralita:** La centralita elegida es la Landi Omegas para 5 6 u 8 cilindros con Multipoint OBD, la cual nos permite su conexión a un ordenador para observar los datos recogidos. El precio de esta es de 310€.
- **Conmutador:** Se escoge un conmutador Landi Renzo Omegas con un precio de 34€.

El coste total de las piezas necesarias para la adaptación a GLP del autobús híbrido es de 1.602,48 €, lo que deja para el resto de costes como la mano de obra o las herramientas utilizadas 757,02 €.

### 3.4.2. Precio del combustible

Para el cálculo del precio del combustible utilizado a lo largo de la vida útil del vehículo se necesita saber cuánto combustible consumirá cada autobús a lo largo de su vida, así como el precio del combustible utilizado por cada uno. El primer factor ya se ha calculado en apartados anteriores, con lo que solo se necesita obtener el precio de cada combustible. Estos precios fluctúan considerablemente en periodos cortos de tiempo, así como de un punto de suministro a otro. A fin de establecer un precio el cual pueda servir de referencia y comparación entre los combustibles, se escoge el precio medio de las gasolineras en España a día 30 de noviembre del 2016. Aquí se muestran los precios medios de los combustibles más utilizados.

**Precio gasolina sin plomo 95 - 1,202 €/l**

**Precio gasolina sin plomo 98 - 1,324 €/l**

**Precio gasóleo A - 1,094 €/l**

**Precio gasóleo A+ - 1,160 €/l**

**Precio gasóleo B - 0,765 €/l**

**Precio gasóleo C - 0,838 €/l**

**Precio Autogás (GLP) - 0,607 €/l**

Para el autobús con motor diésel, que utiliza gasóleo como combustible, se utiliza un gasóleo A, el indicado para motores utilizados en automoción, a diferencia del tipo B, usado en motores de embarcaciones o vehículos agrarios, y el C, usado para la alimentación de calderas.

Para el cálculo es necesario conocer la densidad a la que es comercializada cada combustible, para, sabiendo la masa usada de cada combustible, calcular el volumen equivalente. Esta densidad varía de una región a otra pero, aproximadamente, la densidad de los combustibles es de 0,832 kg/l para el gasóleo y 0,564 kg/l el GLP o Autogás.

**3.4.2.1. Precio combustible autobús diésel**

$$Precio = \frac{1.457.372 (kg)}{0,832 \left(\frac{kg}{l}\right)} \times 1,094 \left(\frac{€}{l}\right) = 1.916.304,05 (€)$$

**3.4.2.2. Precio combustible autobús híbrido diésel**

$$Precio = \frac{1.093.029 (kg)}{0,832 \left(\frac{kg}{l}\right)} \times 1,094 \left(\frac{€}{l}\right) = 1.437.228,04 (€)$$

**3.4.2.3. Precio combustible autobús híbrido GLP**

$$Precio = \frac{1.251.518,205 (kg)}{0,564 \left(\frac{kg}{l}\right)} \times 0,607 \left(\frac{€}{l}\right) = 1.346.935,37 (€)$$

**3.4.3. Precio total**

Una vez calculados los costes por separado de los factores del autobús, se calcula el precio total de cada autobús y el porcentaje que asume cada parte a modo de ayuda. En la siguiente tabla se pueden ver reflejados.

	Lion's City Diésel	Lion's City Hybrid Diésel	Lion's City Hybrid GLP
Precio del autobús (€)	250.000	350.000	350.000
Precio de la adaptación(€)	0	0	2.359,5
Precio del combustible (€)	1.916.304,05	1.437.228,04	1.346.935,37
Precio total (€)	2.166.304,05	1.787.228,04	1.699.295,87
Precio del autobús (%)	11,54	19,58	20,60
Precio de la adaptación (%)	0	0	0,14
Precio del combustible (%)	88,46	80,42	79,6

Tabla 14: Desglose del precio de los autobuses

Analizando la diferencia de los costes se llega a una serie de conclusiones bastante interesantes.

La diferencia entre el precio inicial del autobús convencional y el autobús híbrido es de 100.000€; no obstante, el ahorro de combustible es superior a esta diferencia, siendo de 479.076,01€ en el caso del autobús híbrido diésel y de 569.368,68€, con lo que esta inversión inicial es más tarde recuperada por el ahorro del combustible. Por otra parte, el menor precio del GLP frente al diésel hace que el ahorro de combustible sea de 90.292,67€, aunque el consumo total sea mayor.

También se ve cómo la gran parte del precio total de los tres autobuses se basa en el combustible utilizado y no de la compra ni adaptación de autobús. Además, en lo que al autobús que utiliza GLP como combustible respecta, se observa cómo la adaptación supone una inversión insignificante respecto al precio total, de un 0,14%.

Finalmente se puede ver cómo el autobús diésel convencional es en el que más inversión es necesaria, seguido del autobús híbrido diésel, y por último el híbrido GL

## **4. Conclusiones**

Una vez recopilada y analizada toda la información, y realizados los cálculos que han sido necesarios en este estudio, es posible, y de hecho necesario, extraer unas conclusiones de todo ello que reflejen los resultados obtenidos y que permitan entender a qué punto se ha llegado.

- Debido a la existencia de piezas específicas y facilidad de adaptación, se ha comprobado la viabilidad técnica de un autobús híbrido propulsado por GLP.
- Se ha observado un aumento en el consumo de combustible en modelos accionados por GLP que por gasóleo debido al cambio de motor necesario para la implementación del GLP.
- Al contrario, la implementación de la tecnología híbrida acarrea una disminución del consumo de combustible.
- El ahorro de combustible de los modelos híbridos origina como consecuencia una disminución de las emisiones contaminantes.
- EL uso de GLP genera una disminución en gran parte de las emisiones contaminantes, especialmente en los óxidos de nitrógeno, contaminante muy dañino y expulsado en abundancia por los motores que operan con gasóleo.
- Por otra parte, este combustible también aumenta las emisiones contaminantes de otros compuestos, ya sea por factores intrínsecos al combustible o por el aumento del consumo que el equipamiento de este acarrearán.
- El aumento de estas emisiones son admisibles en algunos casos, y en otras se puede mermar con el uso de tecnologías específicas a este tipo de combustible
- Un modelo híbrido supone un desembolso inicial superior, el cual es recuperado posteriormente por el menor consumo de combustible.
- La adaptación de un autobús para que opere con GLP supone una mínima parte del precio total, un 0,14%, portando consigo una disminución de la inversión como consecuencia del precio del combustible.
- Se ha confirmado por lo tanto la viabilidad económica de un autobús híbrido con GLP, suponiendo una inversión inicial superior a un modelo estándar, pero constatando un ahorro final debido al coste del combustible.
- En definitiva, se ha demostrado la viabilidad de un autobús híbrido accionado con energía eléctrica y GLP, como paso necesario hacia la total implantación de la energía eléctrica en el sector transporte.

## **5. Bibliografía**

MOLERO PIÑEIRO, Eva, POZO RUZ, Ana. *El vehículo eléctrico y su infraestructura de carga*. 1ª ed. España: Marcombo, 2013. 159p. ISBN: 978-84-267-1909-6

FULLEA GARCÍA, José. TRINIDAD LÓPEZ, Francisco, AMASORRAÍN ZABALA, Juan Carlos, SANZBERRO IRIARTE, Mikel. *El vehículo eléctrico. Tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro*. 1ª ed. Aravaca (España): McGraw-Hill, 1978. 225p. Serie Electrotecnologías. ISBN: 84-481-1201-6

EHSANI, Mehdrad, E.GRAY, Sebastien, GAO, Yimin, EMADI, Ali. *Modern electric. Hybrid electric, and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory, and design*. 1ª ed. Florida (E.E.U.U): CRC PRESS, 2005. 395p. ISBN: 0-8493-3154-4

DESANTES FERNÁNDEZ, José M., PAYRI GONZÁLEZ, Francisco. *Motores de combustión interna alternativos* 4º Reimpresión. Barcelona (España), Editorial Reverté, 2011, 1002p. ISBN: 978-84-291-4802-2

<http://www.aoglp.com/gpl/que-es/>

<http://www.minetur.gob.es/energia/gpl/Paginas/Index.aspx>

<http://www.ircongas.com/>

<http://www.glpvalladolid.com/>

<http://recambiosautogas.es/>

<http://www.dieselogasolina.com/>

<http://www.prtr-es.es/>

<https://www.ngk.de>

<https://earthobservatory.nasa.gov/>

<http://www.bus.man.eu/es/es/index.html>

<http://www.engines.man.eu/global/en/index.html>