

Trabajo de Fin de Grado:

**“Estudio de viabilidad técnico-económica
del uso de gases combustibles en el
transporte ferroviario.”**

“Technical-economic viability study of
using combustible gases in rail transport.”

- Autor:
MIKEL PINEDO JIMÉNEZ
- Director/es:
JUAN CARCEDO HAYA
- Convocatoria:
DICIEMBRE 2019



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS





A mis padres Juan y Pili por haber tenido paciencia conmigo, no sólo durante estos años de universidad, si no, desde que era un niño, ayudándome a superar todas las etapas de la vida, hasta día de hoy.

A mis abuelos Iñaki, Aurora, Fede y Carmina, les doy las gracias por haberme enseñado que la vida es mucho más que lo que se aprende en las escuelas.

A los profesores y profesoras que tuve desde mis primeros años de colegio que, aun siendo ingobernable, vieron algo en mí, motivaron mi aprendizaje y nunca dieron mi caso por perdido.

A mis compañeros y compañeras de universidad que desinteresadamente me han ayudado a lo largo de esta prueba de resistencia, sobre todo con los que he compartido mucho más que apuntes.

A mis amigos y amigas que, aun sin darse cuenta, me apoyaron durante este camino.

En definitiva, estas palabras sirven de agradecimiento a todas las personas citadas anteriormente, sin ellas no habría sido posible llegar hasta aquí. Aún queda mucho por delante y espero seguir sintiéndome afortunado. Gracias.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	OBJETIVO.....	9
3.	SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR.....	10
3.1	BREVE HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA.....	10
3.2	RED FERROVIARIA ESPAÑOLA EN LA ACTUALIDAD.....	13
4.	ESTADO DEL ARTE.....	15
4.1	LEGISLACIÓN.....	15
4.2	PROYECTOS ACTUALES.....	19
5.	JUSTIFICACIÓN TEORICA DEL CAMBIO.....	22
5.1	INTRODUCCIÓN.....	22
5.1.1	ESTADO DE LA RED.....	22
5.1.2	CICLO DIESEL.....	22
5.2.3	INTRODUCCIÓN ALTERNATIVAS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	26
5.2	ELECTRIFICACION DE VÍAS.....	27
5.3	GAS NATURAL LICUADO (GNL).....	29
5.3.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.....	29
5.3.2	PRODUCCIÓN Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.....	30
5.3.3	CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.....	37
5.3.4	SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE.....	44
5.3.5	ADAPTACIONES NECESARIAS.....	48
5.3.6	CONSUMO TEÓRICO CADA 100 KILÓMETROS.....	53
5.3.7	CONTAMINACIÓN.....	54
5.4	GASES LICUADOS DEL PETROLEO (GLP).....	56
5.4.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.....	56
5.4.2	RESERVAS MUNDIALES Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.....	57
5.4.3	CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.....	59
5.4.4	ADAPTACIONES NECESARIAS.....	67
5.4.5	SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y DE TRANSPORTE.....	68
5.4.6	CONSUMO.....	69
5.4.7	CONTAMINACIÓN.....	70
5.5	HIDRÓGENO.....	74

5.5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.....	74
5.5.2 RESERVAS MUNDIALES Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.	74
5.5.3 CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.	78
5.5.4 SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE.....	80
5.5.5 ADAPTACIONES NECESARIAS.	82
5.5.6 CONSUMO.....	86
5.6.7 CONTAMINACIÓN.	87
5.6 COMPARATIVA ENTRE LOS COMBUSTIBLES.....	89
6. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA DEL CAMBIO.....	92
6.1 TRAYECTO EJEMPLO.....	92
6.2 LOCOMOTORA.....	94
6.3 SISTEMA ACTUAL: GASÓLEO.	96
6.3.1 CONSUMO.....	96
6.3.2 COSTES DE MANTENIMIENTO.....	97
6.3.3 INGRESOS POR BILLETES.	98
6.3.4 BALANCE DE LA TECNOLOGÍA ACTUAL.	98
6.4 GAS NATURAL LICUADO.....	98
6.4.1 COSTE DE ADAPTACIÓN.....	98
6.4.2 CONSUMO.....	100
6.5 GASES LICUADOS DEL PETRÓLEO.....	101
6.5.1 COSTE DE ADAPTACIÓN.....	101
6.5.2 CONSUMO.....	101
6.6 HIDRÓGENO.....	103
6.6.1 Consumo y coste.....	104
6.6.2 Costes de adaptación.....	106
7. CONCLUSIONES.....	108
8. BIBLIOGRAFIA.....	112



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

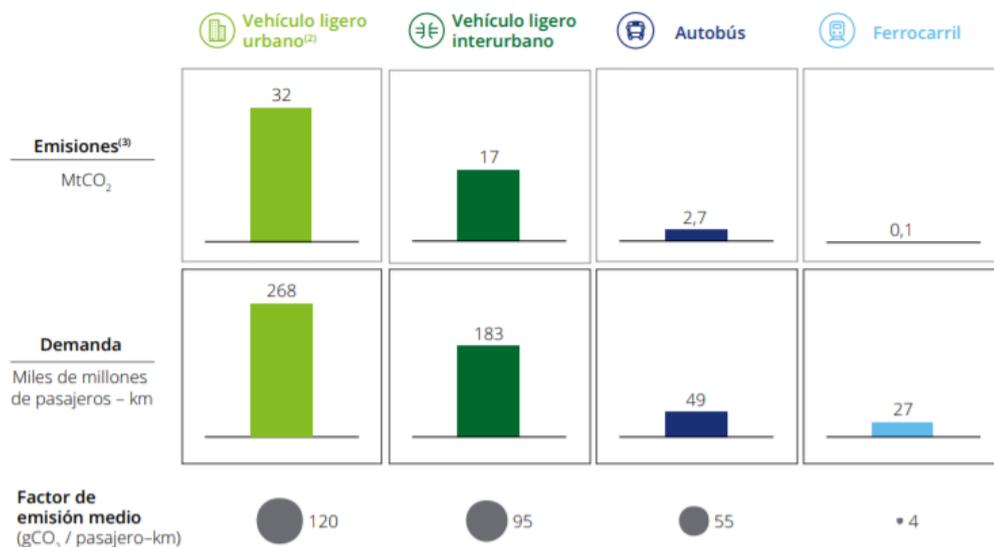


1. INTRODUCCIÓN.

El fuerte desarrollo industrial de la economía mundial desde hace 200 años, y el crecimiento exponencial de la población humana en este periodo, ha hecho que los niveles de contaminación sean insostenibles para la seguridad ecológica de nuestro planeta y, por ende, de las personas. Esto ha desembocado en que los gobiernos de la mayoría de los países desarrollados tengan, como prioridad entre sus políticas, medidas contra la contaminación y de descarbonización a corto, medio y largo plazo.

Los gases de efecto invernadero (GEI) son los compuestos cuya concentración natural en la atmosfera hace que la radiación solar no se escape de ésta y, por lo tanto, no permite la fuga de calor. “Sin los gases de efecto invernadero que se producen naturalmente, la temperatura promedio de la Tierra sería de cerca de 0 ° F (o -18 ° C) en lugar de la temperatura mucho más alta de 59 ° F (15 ° C)” (Qiancheng Ma, marzo de 1998). El problema reside en que, si de forma antrópica la concentración de estos gases aumenta, la temperatura global se verá incrementada, teniendo unas consecuencias casi irreversibles y bastante lesivas para nuestro planeta.

Los GSIs son el H₂O (vapor de agua), CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), NO_x (óxidos de nitrógeno), Ozono (moléculas con tres átomos de oxígeno), y CFC (clorofluorocarbonos).



1.1 Demanda de pasajeros en España y emisiones GEI en función del modo de transporte en 2014.
 Fuente: Análisis Monitor Deloitte.



El 81% de las emisiones contaminantes son en forma de dióxido de carbono (CO₂), el 11% de Metano (CH₄), el 5,5% de óxido nitroso (N₂O) y finalmente el 2,5% en forma de Clorofluorocarburos (CFC). Las emisiones contaminantes se pueden dividir según su sector de procedencia de la siguiente forma: el 75% de estas emisiones provienen del sector energético, el 10,1% de la agricultura, el 8,7% de los procesos industriales y el uso del producto y el 3,2% de la gestión de residuos. [1]

En España el sector del transporte supone un 26% de las emisiones de GSI dentro de la economía nacional. [2] Durante el año 2016 en España se produjeron 340 millones de toneladas de gases contaminantes equivalentes en CO₂, dentro del grueso, el transporte aportó 86 millones de toneladas de CO₂. [3] Si se divide esta cifra según el medio de transporte se obtiene lo siguiente: el transporte por carretera supone un 94% (81 MT de CO₂) de las emisiones, el transporte aéreo un 3,5 % (3 MT de CO₂), el transporte marítimo un 2,3% (2 MT de CO₂) y el transporte en ferrocarril un 0,26% (0,2 MT de CO₂).

2. OBJETIVO.

Hoy en día el transporte de pasajeros por ferrocarril es uno de los métodos de movilidad más eficientes del mundo, tal y como demuestran las cifras anteriormente citadas. Aun así, se debe seguir avanzando como sociedad hasta conseguir la menor tasa de GEI emitida por cada locomotora. Considerando un horizonte a medio/largo plazo, tanto por iniciativa pública como privada, han aparecido proyectos en diferentes lugares del globo para minimizar paulatinamente estas emisiones. En cada uno de ellos se ha considerado que, ante el coste tan elevado de electrificación de todos los kilómetros de vías, la sustitución del gasóleo como combustible predominante (en las líneas no electrificadas) por gas natural licuado (GNL). En el presente trabajo se va a mostrar la situación y funcionamiento del sector actualmente en España. Se presentarán tres posibles candidatos a sustituir el gasóleo: GNL, GLP e Hidrógeno, describiendo teóricamente todos los puntos clave necesarios para dar una visión objetiva sobre el camino que se debe seguir en los próximos años. A continuación, se realizará un estudio sobre un trayecto ejemplo, aplicando la teoría de estos combustibles a la realidad, en la medida de lo posible, para demostrar si las premisas de las que se parten son correctas y si es cierto que el GNL es el mejor combustible alternativo para la sustitución del gasóleo en las locomotoras de tracción diésel.

3. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR.

3.1 BREVE HISTORIA DEL FERROCARRIL EN ESPAÑA.

En este apartado se utilizarán las obras citadas en la bibliografía que versan sobre la historia del ferrocarril en España para ayudar al lector a entender cómo y cuándo se dieron los pasos que han llevado a este sector a ser lo que es hoy en día.

Desde la antigüedad, la humanidad ha utilizado los medios a su alcance para transportar mercancías y muchas otras cosas de la manera más productiva. A finales del S. XVIII y durante todo el S. XIX, durante el auge de las industrias del metal y la minería, se inventaron máquinas que pudieran mover grandes cantidades de materiales. Como invento predominante de la revolución industrial, la máquina de vapor se utilizó tanto para el transporte marítimo como para una nueva tecnología: el ferrocarril.

En España, en 1844, por primera vez se realizó, por parte del gobierno, un estudio (Informe Subercase) para fijar los criterios y condicionantes que debían de cumplir los ferrocarriles nacionales. El estudio establecía el ancho de vía nacional en 1668 mm, más amplio que el predominante en Europa, e instaba al gobierno a invertir capital en nuevos proyectos, pero que, por falta de dinero, también favorecía la iniciativa privada. “El informe fue base de la Real Orden de 1844” Mateu Morillas-Torné, 2017. La Real Orden de 1844 no fijaba concesiones públicas ni tiempos de explotación de carácter general, pero sí que permitía hacerlas para proyectos concretos. A pesar de la Real Orden anteriormente citada, la cual había concedido 5000 km de vías, en 1850 sólo existía el tren de Barcelona-Mataró, necesitado de capital privado para poder realizarse, lo que determina que fue una ley mal planificada.

El sector no se vio dinamizado hasta 1855 con la llamada Ley de Ferrocarriles. Esta ley tenía dos puntos fundamentales: el sistema ferroviario nacional es un servicio público y que las concesiones tienen un límite de 99 años. También concedía subvenciones públicas de carácter general y ayudas a la hora de empezar las obras: expropiaciones, extensiones fiscales...etc. Mediante esta ley se consiguió impulsar el sector y atraer inversores extranjeros. Las líneas construidas más conocidas fueron Gijón-Langreo (1862) y Alar-Santander (1866). Éste último fue el primer ferrocarril nacional de largo recorrido con 139 km, cuyo objetivo era proyectar el grano a través del puerto de Santander. Después de 15 años de entrada en vigor de esta ley, se superaron los 5000 km de vías férreas.

El Decreto-Ley de 1868 eliminó todas las concesiones públicas y estableció la libertad tarifaria, medidas liberales impulsadas durante el Sexenio Revolucionario. Aunque esta ley no eliminó por completo las ayudas estatales, los contingentes destinados al sector no fueron para nada los adecuados, lo que hizo que disminuyeran notablemente las construcciones de nuevas vías. Más tarde, durante la Restauración Borbónica (1874),



estas medidas fueron suprimidas, volviendo a la legislación anterior. A su vez se tramitaron la Ley de Bases para la Legislación de Obras Públicas (1876) y la Ley General de Obras Públicas (1877). Estas dos leyes reforzaron las políticas anteriores al Sexenio Revolucionario dotando de una mayor inversión a la construcción y mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias. El último tramo de siglo XIX estuvo marcado por el fuerte desarrollo del ancho estrecho, conocido ahora como tren de cercanías, pasando a casi 2000 km de vías en el periodo indicado.

Durante los primeros años del siglo XX se aprobaron varias leyes: Ley de Ferrocarriles de Línea Estrecha (1904 y 1908), la cual determinaba que tipos de vías recibían subvención y cuales no y la Ley de Ferrocarriles Secundarios y Estratégicos (1912), la cual determinaba cuáles de estas vías anteriormente citadas tenían importancia para la defensa nacional. Durante y después de la Primera Guerra Mundial (1914-1918) las materias primas que estaban directamente relacionadas con el ferrocarril (carbón, madera, acero...) subieron mucho su precio, lo que propició la disminución de la actividad ferroviaria.

En 1926 el gobierno crea EFE, Explotación de Ferrocarriles del Estado, un ente público cuyo objetivo fue nacionalizar todas las vías que estuvieran en situación precaria, sin importar su ancho. Después de la Guerra Civil Española (1936-1939) el sector quedó muy dañado y no es hasta 1941 que una nueva legislación fue aprobada, la Ley de Bases de Ordenación Ferroviaria y Transportes por Carretera, que englobó a todas las vías, incluyendo las de EFE, en una sola empresa pública, RENFE (Red Nacional de Ferrocarriles Españoles), la cual se había creado hace poco tiempo. El principal objetivo que se marcó por parte de RENFE fue recuperar las infraestructuras después del daño causado por la guerra y dinamizar el sector ofreciendo subvenciones públicas. Siguiendo con esta idea e intentando dinamizar la creación de más vías estrechas en el territorio nacional, se presentó el Plan de Mejora y de Ayuda del Estado a los Ferrocarriles de Vía Estrecha (1953). Ninguno de estos intentos fue satisfactorio al tratar de dinamizar el ancho de vía estrecho, por lo que el Estado creó en 1965 otra empresa pública, FEVE (Ferrocarriles Españoles de Vía Estrecha). Ésta aglutinó todas las vías estrechas del territorio nacional, incluidas también las vías secundarias gestionadas por EFE. El resto fueron cerrando poco a poco durante la década de 1960 hasta hacer desaparecer la empresa pública EFE junto con más de 1000 km de vía estrecha.

En 1978, con la llegada de la Constitución Española, las competencias del uso y mantenimiento de las vías pasaron a manos de las autonomías, todas menos las vías que interconexionaban puntos alejados del territorio español como Ferrol-Bilbao y Valmaseda-León-La Robla. En este periodo se crean las empresas dentro de cada Comunidad Autónoma: Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, Serveis Ferroviaris de Mallorca, Eusko Trenbideak – Ferrocarriles Vascos S.A.



En los primeros años de la democracia española se gestionó el Plan General de los Ferrocarriles (1979), con una vigencia esperada de 12 años, el cual buscaba la dinamización del sector, tanto en dar servicio real de transporte a todos los españoles como fomentar la creación de las nuevas vías que se estaban demandando en ese momento. Durante estos años RENFE consigue la creación de los trenes de cercanías en los grandes núcleos de población (Madrid, Barcelona, Valencia y Málaga) los cuales tienen una gran demanda y acaban siendo un éxito. El problema llega alrededor de 1984 cuando RENFE se encuentra en una situación complicada ya que tiene muchas pérdidas anuales por gestionar vías sin ninguna rentabilidad. Para solucionar este problema, el año siguiente, se cierran 12 líneas con casi 1000 km de vías y las Comunidades Autónomas adoptan unos 800 km de vías para salvarlas de la quiebra [4].

En 1987, con el Plan de Transporte Ferroviario, el gobierno dio continuidad a las políticas de apoyo a RENFE y aprueba el Nuevo Acceso Ferroviario a Andalucía (NAFA), el cuál será construido en ancho UIC europeo. Las líneas de Alta Velocidad también serán construidas en ancho UIC. En 1991 RENFE cambia su organización y las vías pasan a clasificarse en torno a 3 grupos: Cercanías, Media Distancia y Larga Distancia, en lugar de la organización anterior en “Zonas”, reduciendo costes en burocracia interna.

El 14 de abril de 1992 se inaugura en España la primera línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, no es hasta 2003 que se inaugura la siguiente línea de alta velocidad Madrid-Barcelona.

En 2005 RENFE desaparece, dando lugar a ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) al fusionarse con Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (GIF). Esto significó el fin del monopolio legal por parte de RENFE, y la asunción de sus competencias por parte de ADIF, que gestionará a partir de aquí estaciones, vías...etc. y RENFE Operadora, que es en la actualidad la encargada del mantenimiento y fabricación de material ferroviario y del transporte de pasajeros y mercancías.

A continuación, como síntesis, una tabla muestra la evolución de los km de vías en España desde 1850 hasta 2010: [4] [5] [6] [7]



Año	Vía estrecha (km)		Ancho Ibérico (km)		Total (km)		% vía estrecha
	En servicio	Evolución	En servicio	Evolución	En servicio	Evolución	En servicio / total
1850	0,00	-	25,99	-	25,99	-	0,00
1860	14,71	14,71	1.011,95	985,96	1.026,66	1.000,67	1,43
1870	154,64	139,93	5.095,02	4.083,07	5.249,67	4.223,00	2,95
1880	358,76	204,12	6.445,84	1.350,82	6.804,60	1.554,93	5,27
1890	902,94	544,18	8.399,73	1.953,89	9.302,67	2.498,07	9,71
1900	1.901,26	998,32	10.123,62	1.723,88	12.024,87	2.722,20	15,81
1910	2.882,24	980,98	10.450,76	327,14	13.333,00	1.308,12	21,62
1920	3.789,63	907,40	10.552,49	101,73	14.342,12	1.009,12	26,42
1930	4.227,44	437,81	11.060,29	507,81	15.287,74	945,62	27,65
1940	4.198,36	-29,08	12.227,46	1.167,17	16.425,82	1.138,08	25,56
1950	4.224,24	25,89	13.036,00	808,54	17.260,24	834,42	24,47
1960	3.818,05	-406,20	13.410,89	374,89	17.228,93	-31,31	22,16
1970	2.696,87	-1.121,18	13.427,05	16,16	16.123,92	-1.105,02	16,73
1980	2.067,32	-629,54	12.434,22	-992,83	14.501,54	-1.622,37	14,26
1990	1.930,98	-136,35	11.190,65	-1.243,57	13.121,63	-1.379,92	14,72
2000	1.896,15	-34,82	10.846,76	-343,88	12.742,92	-378,71	14,88
2010	1.947,57	51,42	10.016,97	-829,79	11.964,54	-778,38	16,28

3.1 Tabla de km de vía nacionales frente a los años. Fuente: [6].

3.2 RED FERROVIARIA ESPAÑOLA EN LA ACTUALIDAD.

Siguiendo la Ley 39/2003 del 17 de diciembre del Sector Ferroviario, el Ministerio de Fomento es la entidad que gestiona la administración del sector ferroviario en España. Sus principales objetivos son: “Planificación estratégica del sector ferroviario, tanto de las infraestructuras como de la oferta de servicios, la ordenación general y la regulación del sistema ferroviario, en especial todo lo relacionado con la seguridad e interoperabilidad del sistema ferroviario y con las relaciones entre los agentes del sector. Y, por último, la definición de objetivos y la supervisión de la actividad de las entidades públicas empresariales ferroviarias, ADIF y RENFE, así como de su sistema de financiación.” Ministerio de Fomento de España. [11]

En manos de ADIF se encuentra la gestión de 11.992 km de ancho ibérico (1668mm), de los cuales 3.152 km de ancho UIC (Ferrocarril de Alta Velocidad). Esta red es propiedad de ADIF y por ella circula el parque móvil de RENFE (empresa pública nacional). La red se puede dividir en tres grandes grupos: [8] [9]

- Red de Alta Velocidad (AVE): con datos del 2018 hemos alcanzado los 3,152 km de alta velocidad. Recordamos que el ancho de estas vías es tipo UIC, el más utilizado en Europa. [10] [11]
- Red electrificada: red de ferrocarril cuyo combustible es la electricidad. Se extiende por el norte y el sur peninsular con ancho ibérico (1668mm), 6,820 km de líneas electrificada en 2016. [10] [11]

- Red no electrificada: red de ferrocarril cuyo combustible es el diésel en su mayoría, Suelen ser vías de cercanías en las cuáles la electrificación no sería rentable, Ancho ibérico. [10] [11]

A continuación, veremos un mapa, elaborado por ADIF con fecha 31 de Julio de 2018, donde se encuentran la totalidad de vías ferroviarias del territorio nacional:



3.2 Mapa de las vías férreas gestionadas por ADIF. Fuente [10]

4. ESTADO DEL ARTE.

A continuación, se hará descripción de la legislación europea y española en vigor sobre el uso de combustibles alternativos en el sector del transporte, y más en concretamente en el transporte ferroviario. Se desarrollarán las directrices europeas han aparecido en los últimos 15 años y las que existían en ámbito nacional, que clarificaban el futuro del uso de los combustibles alternativos en el transporte en España. Se hará un breve resumen de los diferentes proyectos que hay en el mundo y los que están desarrollándose en territorio español o con ayuda de empresas españolas.

4.1 LEGISLACIÓN.

En 2013, la Comisión del Parlamento Europeo, realiza un comunicado a todos los agentes implicados en la legislación europea con el siguiente título: “Energía limpia para el transporte: Estrategia europea en materia de combustibles alternativos”. El comunicado empieza con una introducción, en la que se describe lo que ya se ha comentado previamente en este estudio: la gran dependencia del transporte europeo (y mundial) en los combustibles fósiles. El comunicado asegura que desde la Unión Europea se debe trazar “Una estrategia en el sector del transporte que sustituya progresivamente el petróleo por combustibles alternativos y cree las infraestructuras necesarias podría suponer ahorros en la factura de las importaciones de petróleo de 4 200 millones EUR anuales en 2020, y de hasta 9,3 millones EUR anuales en 2030, y otros 1 000 millones EUR anuales derivados de la moderación de las subidas de precios,” Comisión Europea (Bruselas), 2013. También apuntaron que esto impulsaría y generaría el avance hacia una nueva tecnología de mayor eficiencia en el transporte y nuevos puestos de trabajo dentro de la Unión, hasta unos 700.000. Este comunicado se basa en el Libro Blanco de 2011 sobre el transporte, también publicado por la Comisión Europea, en el que se postulaban las primeras directrices sobre la transición ecológica de los combustibles usados en el sector del transporte. El objetivo del comunicado es hacer saber y explicar a los países de la Unión Europea y, por tanto, a las empresas implicadas en el sector, cómo se va a abordar el problema de la descarbonización del transporte desde el punto de vista de una legislación común. Se describen los beneficios que se obtendrían a corto plazo sustituyendo los combustibles convencionales por otros menos contaminantes, con una eficiencia cercana a los convencionales y con una seguridad de suministro que los combustibles fósiles convencionales no ofrecen. [12]

Más adelante, el 22 de octubre de 2014, el Parlamento Europeo aprueba la directiva 2014/94/UE relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos. El objetivo principal de esta directiva es ayudar a los países miembros a implantar medidas para la creación y mejora de las infraestructuras necesarias para el



uso de los combustibles alternativos propuestos anteriormente en el sector del transporte. Establece los requisitos mínimos que se tienen que cumplir a través del marco legal de cada país de la Unión Europea: puntos de recarga, información a los usuarios, subvenciones a empresas y particulares...etc. Esta directiva debía de ser transmitida por los países antes de dos años. Con esta directriz se empieza realmente a legislar sobre las medidas alternativas para la transición hacia un sector del transporte más eficiente y limpio. [13]

Ese mismo año se pone en marcha el proyecto “Clean European Rail-Diesel” que satisfacía los criterios de la Directiva Europea 2004/26/EU que determinaba los valores de emisiones de GEI que había que alcanzar en los próximos años. “El objetivo de esta investigación fue desarrollar, mejorar e integrar tecnologías de reducción de emisiones para locomotoras diésel y vehículos de transporte ferroviario. El objetivo cuantitativo era alcanzar niveles de emisión por debajo de los límites establecidos por la nueva Directiva Europea 2004/26/EC y las futuras regulaciones (que se han logrado), mientras que, además de la descripción del tema, evalúa las mejores soluciones innovadoras e híbridas posibles para una contribución a la reducción de las emisiones de CO₂.” Comisión Europea, 2014. En resumen, este estudio fijó los puntos necesarios sobre los que había que trabajar para conseguir una descarbonización paulatina del ferrocarril en Europa:

- Estudio de los motores diésel IIIB existentes para conseguir disminuir la emisión de gases, manteniendo su eficiencia.
- Trabajar en la transparencia hacia los fabricantes diésel, para hacerles comprender la importancia del desarrollo de nuevas tecnologías.
- Garantizar un estándar de calidad de los nuevos diseños de los motores para demostrar a la industria que es posible el cambio.
- Garantizar a los compradores la optimización de la vida útil de los vehículos por medio de pruebas especificadas por la Directiva.
- Estudios que demuestren que la hibridación es una posibilidad, al igual que otro tipo de tecnologías, en un futuro cercano.

El proyecto llegó a las siguientes conclusiones:

- Mediante combinación de la tecnología actual de los motores y utilizando el consumo de un combustible diésel actual, se puede llegar a los estándares medioambientales previstos. Esto repercute en el presupuesto para nuevas locomotoras, ya que se necesita la última tecnología, sobre todo en métodos de tratamientos de emisiones.
- Las exigencias medioambientales aumentan con el desarrollo tecnológico de las sociedades, por lo que en un futuro se espera que éstas sean más restrictivas, y será preciso estudiar, para su posterior implantación, otras vías, como puede ser la hibridación. Es decir, el uso de varios combustibles para el alimento del motor,



que mantengan o aumenten la eficiencia. Esto será un fuerte condicionante ya que el tiempo de maduración de esta tecnología es alrededor de los 10 años o más, y por el tiempo y costes necesarios para la modificación de las unidades existentes con más antigüedad. [14]

También en 2014 la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) lanzó el proyecto “Low Carbon Rail Challenge”. El principal reto de este proyecto era mejorar la eficiencia del sector para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, para esto se fijaron unos objetivos cuantitativos en los que se proponía disminuir el consumo de combustibles fósiles en un 60% y las emisiones de CO₂ en un 75%, al alcanzar el año 2050. Para saber si el proyecto estaba surtiendo efecto, se fijó la consecución de la mitad de esos valores en un horizonte intermedio para 2030, Muchos agentes del sector tuvieron sus dudas ante este proyecto ya que, como se ha descrito anteriormente, el ferrocarril es el medio de transporte más eficiente en la actualidad, pero un año más tarde, la Cumbre del Clima de París (2015) abaló la mayoría de estos ambiciosos objetivos, Las principales actuaciones se harían sobre el material rodante: modificando motores y fabricando coches más modernos, y sobre el diseño de las vías (electrificación). [15]

Un año después, en la Cumbre del Clima de París, organizada por Naciones Unidas, se firmó una hoja de ruta muy importante mediante la cual los países firmantes se comprometían a disminuir sus emisiones de GEI para alcanzar las siguientes metas:

- Objetivo a largo plazo: no aumentar la temperatura global del planeta 2°C por encima de los niveles de antes de la industrialización.
- Objetivo de reducir este incremento de temperatura al 1,5°C, lo cual reduciría mucho el impacto en el medio ambiente.
- Necesidad de llegar al pico máximo de emisiones de GEI globales, entendiendo que esto dependerá de cada país.
- Implementación de financiación para proyectos que modernicen los sectores más contaminantes, siendo uno de los pilares más importantes para generar nuevas economías mucho menos contaminantes.

Como se ha dicho en páginas anteriores, este momento fue un punto de inflexión dentro del sector del ferrocarril, ya que, aunque ya había proyectos pioneros, la industria se vio apoyada por parte de las instituciones, sobre todo mediante financiación y apoyo a nivel europeo y global. Esto dinamizó en gran medida la legislación por parte de los gobiernos europeos y por lo tanto, aparecieron nuevos proyectos más consolidados, con unos objetivos realmente alcanzables. [16] [17]

Este mismo año aparece el proyecto SUSTRAIL (The Sustainable Freight Railway) sufragado por la Unión Europea. Este proyecto tiene como propósito principal dotar a la infraestructura del transporte de mercancías (tanto locomotoras como vías) de nuevas maneras de funcionar para conseguir un transporte más eficiente. “Estos avances



deberían mejorar la eficiencia y fiabilidad del transporte ferroviario de mercancías y reducir la frecuencia y los costes de mantenimiento.” Comisión Europea, Cordis (resultados de investigaciones de la EU), 2015. Los objetivos principales marcados para conseguir dicha eficiencia eran:

- Reducir el daño sobre la vía aplicando un sistema doble de suspensión llamado “lenoir link”.
- Reducir desgaste de las ruedas y mejorar la marcha mediante el uso de eslabones más rígidos de conexión entre vagones.
- Reducción del ruido mediante la inserción de discos de freno más modernos.
- Mejora del sistema de frenado: “discos de freno, sistema de respaldo neumático redundante, protección contra deslizamiento de ruedas.” Comisión Europea, Cordis (resultados de investigaciones de la EU), 2015.
- “Monitoreo de condición: válvulas de pesaje instaladas en el coche para monitoreo de carga local; Control de frenado electroneumático con funcionalidad de diagnóstico, Termopares y acelerómetros en cada caja de ejes,” Comisión Europea, Cordis (resultados de investigaciones de la EU), 2015.
- Suministro inteligente de energía mediante dispositivos electrónicos.
- Reducir pesos, utilizando materiales modernos y diseños optimizados.
- Protección del eje mediante revestimiento de este.

Todas estas medidas se implementaron sobre una locomotora piloto, con el fin de descubrir si los resultados eran los esperados. Se redujeron costes de mantenimiento, tiempos de espera y de trayecto, La conclusión de haber cumplido los objetivos fijados es que se puede conseguir un transporte por ferrocarril más eficiente simplemente actuando sobre la logística y con pequeñas modificaciones del vehículo. Este proyecto marcó un precedente empírico para el futuro, dando pie a realizar pequeños pero progresivos cambios en el sector ferroviario, como se verá a continuación. [18]

En España ya existía cierta normativa a seguir antes del desarrollo de las directrices europeas, como fue “La Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012” y su última hoja de ruta “Plan de Acción 2008-2012”. Este plan aglutinaba 15 medidas por las que se instaba a integrarse a todos los agentes de los diferentes medios de transporte a un nuevo modelo de transporte, menos contaminante y más eficiente. [19] [20]

Como se ha descrito anteriormente, todos los países de la Unión Europea debían de transcribir la Directiva 2014/94/UE antes del plazo de un año desde su implantación. Hay que recordar que esta ley instaba a los gobiernos a mejorar la red de abastecimiento de combustibles alternativos. Por parte de España se transpuso por medio del “Real Decreto 639/2016” y del “Marco de Acción Nacional (MAN)” sobre combustibles alternativos en el transporte. En este marco se incluyeron 57 disposiciones que hacían posible la completa adaptación del país a las directrices europeas. Estas medidas se centraron más en el transporte por carretera y el marítimo, uno al ser el más



contaminante del país y el otro por sus grandes consumos. Estas normativas dieron un empujón a las empresas automovilísticas del país para la fabricación de coches, furgonetas y camiones con combustibles alternativos. Esto también ayudó a que la tecnología para los motores tradicionales de diésel o gasolina se desarrollara, dando un salto en eficiencia y reducción de emisiones.

4.2 PROYECTOS ACTUALES.

Como se ha comentado anteriormente, el uso de los gases como combustibles es una tecnología en vías de desarrollo en el sector ferroviario, aunque en otros sectores del transporte, como es el transporte por carretera, esté bastante asentado. La mayoría de los proyectos relacionados con este tema se han venido desarrollando en EE, UU, y Canadá, más centrados en la búsqueda de la eficiencia energética que en un combustible limpio. También hay existen proyectos destacables en Rusia, Perú y algún país asiático.

“Aunque existen proyectos emprendidos anteriormente con resultados limitados, es en la presente década cuando toman un mayor impulso las iniciativas como consecuencia de la conjunción de varios factores (reducción de los precios del gas, mayores garantías de suministro y endurecimiento de las exigencias medioambientales).” Claudio Rodríguez, Vía Libre nº13, diciembre 2017.

Como se cita en la publicación de Claudio Rodríguez en la revista Vía Libre, la mayoría de estos proyectos llevados a cabo en Estados Unidos están siendo todo un éxito. No existe mucha información al respecto ya que, como se ha dicho, es una tecnología en desarrollo y las empresas protegen mucho dichos proyectos. Aun así, se sabe que las principales compañías ferroviarias norteamericanas están derivando los avances conseguidos en los proyectos de investigación al transporte comercial y de mercancías, como por ejemplo Florida East Cost o Indiana Harbor Belt, que han decidido recientemente modificar las unidades más modernas, las más fáciles de transformar.
[20]



4.1 Foto de la locomotora "Florida East Coast". Fuente: [20].

En Europa no existen proyectos de una magnitud relevante hacia el uso de GNL en el transporte ferroviario. En cambio, en el transporte marítimo sí. Los buques de transporte de mercancías, y hasta los comerciales, tienen unos consumos gigantescos. Dentro de este ámbito, la empresa española Enagas y con apoyo del Gobierno Español lidera el proyecto "Core LNG Gas Hive". Este proyecto es apoyado por la Comisión Europea, y cuyo objetivo es impulsar el uso del GNL en el transporte marítimo. El 23 de marzo del pasado año, en el marco de la Feria de la Energía de Galicia, tuvo lugar una conferencia en la que múltiples agentes del sector y de gobiernos regionales y central dieron a conocer los avances tanto en los estudios como en la legislación necesaria para hacer de España un país puntero en el uso del GNL en el transporte marítimo. El presidente de Puertos del Estado, José Llorca, expuso que el "Core LNG Gas Hive" "es un proyecto de Estado ya que, en el ámbito del transporte marítimo internacional, España está en el eje de las grandes rutas y en una posición privilegiada para el avituallamiento de buques de GNL. Porque somos el primer país de Europa en infraestructuras." El señor Llorca notificó que se iba a publicar un Real Decreto sobre los peajes de acceso a GNL para abastecimientos menores de 5.000 m³. "Esto es esencial para hacer de España un centro de operaciones de GNL. También están avanzados otros aspectos regulatorios para que el avituallamiento pase a ser un servicio portuario básico." Añadió también. [21]

"El objetivo de este proyecto es crear una cadena logística integrada, segura y eficiente para el suministro de GNL como combustible en el sector del transporte, especialmente marítimo, en la Península Ibérica, Liderado por Puertos del Estado y coordinado por Enagás, el proyecto CORE LNGas hive cuenta con un total de 42 socios de España y Portugal: 8 socios institucionales; 13 autoridades portuarias, y 21 socios industriales



(operadores de GNL, constructoras navales, regasificadoras y otras empresas).” Informe anual 2018, REGANOSA. [22]

En este momento en España existen una serie de proyectos destinados al estudio del uso de GNL en el transporte ferroviario y otras situaciones similares. A continuación, se resumen los principales:

- Proyecto llamado “Shunter” por el cual las locomotoras de los puertos, las que conectan terminales transportando mercancías pesadas, se alimenten mediante GNL. Aún está en fase de diseño. Desarrollado por Renfe, en asociación de otras empresas.
- Otro proyecto financiado por Renfe, con 2,5 Millones de Euros, es el cual está investigando la posibilidad de generar hidrógeno a partir de GNL. Este estudio buscaría la transición energética desde el GNL al hidrógeno, tecnología cuyo futuro es muy prometedor.
- Modificación de locomotora S/1600. Proyecto dotado con 4,5 Millones de Euros, en el cual se pretende usar GNL como combustible alternativo en diferentes vías, tanto en transporte de viajeros como de mercancías, para estudiar desde un punto de vista técnico si este combustible es viable para la red española de ferrocarriles. La duración del proyecto es aproximadamente de 3 años y aún está en fase de licitación. Empresa licitadora: Enagas. [20] [23] [24]

Dentro del ámbito nacional cabe destacar un proyecto en concreto, por su alto nivel de desarrollo, y del cual este trabajo ha obtenido mucha información técnica para llegar a realizarse. Dicho proyecto es denominado “GNL2600”, desarrollado por Renfe, Enagas, Institut Cerdá, Gas Natural Fenosa, Bureau Veritas y AMRF (Empresa de restauración de material rodante), con un presupuesto de alrededor del millón y medio de euros. El estudio pretende sustituir un motor diésel por otro motor alimentado mediante GNL, de una de las dos cabezas tractoras de un tren de cercanías, de la serie 2600, que opera en la comunidad autónoma de Asturias. El objetivo es generar un informe con la comparativa de emisiones, consumo y eficiencia de cada una de las dos cabezas tractoras, una alimentada por diésel y la otra alimentada por GNL, para demostrar que el GNL es un combustible alternativo capaz de sustituir al diésel en el transporte ferroviario de líneas secundarias y mercancías. [25] [26]

5. JUSTIFICACIÓN TEORICA DEL CAMBIO.

5.1 INTRODUCCIÓN.

5.1.1 ESTADO DE LA RED.

En España existen aproximadamente 13.000 km de vías férreas en total, teniendo en cuenta líneas de alta velocidad, líneas de cercanías y convencionales. Como se ha descrito anteriormente, ADIF no tiene la titularidad de la totalidad de las vías férreas del país, éstas se dividen entre la propia ADIF y las diferentes empresas públicas gestionadas por ciertos gobiernos autonómicos nacionales. En cifras brutas, en 2019 ADIF tiene en su poder la gestión de 11.992 km, de los cuales sólo 6.741 km están electrificados, es decir, el 56%. El resto de los kilómetros de vías están recorridos por trenes movidos mediante motores diésel. [10] [11]

Antes de profundizar en el tema es necesario aclarar que los trenes en España están movidos por cabeza tractoras a las que denominamos automotores. Un automotor es un vagón de viajeros que tiene un motor incorporado y una locomotora es un vagón que sirve solo como generador de movimiento. Existen dos tipos de automotores que usan como combustible el diésel en España, los automotores Diésel-Eléctricos y los Diésel-Hidráulicos. Los automotores Diésel-Eléctricos se componen a partir de un motor diésel acoplado a un generador eléctrico que produce la energía eléctrica necesaria para el movimiento de la máquina, Por definición, se pueden usar en vías híbridas, es decir, en trayectos largos donde existan vías electrificadas y sin electrificar, usar el motor diésel solo cuando sea necesario. Por el contrario, los automotores Diésel-Hidráulicos están compuestos por un motor de ciclo diésel acoplado a un sistema hidráulico que amplifica la potencia de éste y permite alcanzar una velocidad mayor. Este tipo de trenes no podrían utilizarse con energía eléctrica en las vías electrificadas. [27] [28]

Este estudio tiene como objetivo demostrar si la sustitución del diésel, por algún combustible gas, en los automotores es técnica y económicamente viable, por lo que se centrará en estudiar los trenes que circulen por vías no electrificadas. Se empezará describiendo las características técnicas de los motores con ciclos diésel y a continuación se estudiarán los combustibles gaseosos alternativos mediante unos criterios previamente explicados.

5.1.2 CICLO DIESEL.

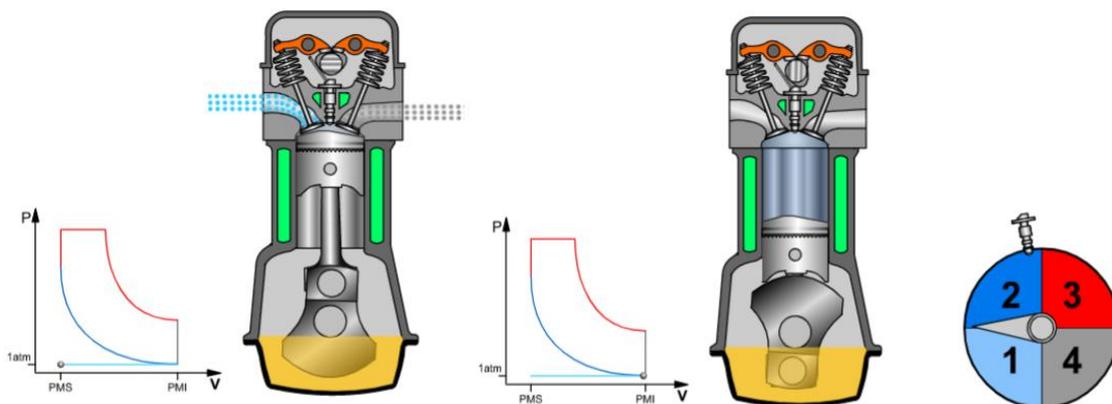
El motor diésel recibe su nombre gracias al ingeniero alemán Rudolf Diésel, quien lo inventara en 1893, trabajando para la empresa automovilística MAN, Los motores diésel

son motores de combustión interna en los que se producen una reacción de autoignición del combustible debido a las condiciones de alta presión y temperatura. Estos motores se rigen respecto al ciclo diésel. [29] [30]

El fundamento de los motores diésel es que, al comprimir el aire a unas presiones muy altas e inyectar un combustible con una alta velocidad de ignición, éste arde automáticamente. En los ciclos diésel se utiliza como combustible principal el gasóleo, pudiendo utilizarse otros compuestos en adición o sustitución como el biodiesel o aceites refinados. El gasóleo es obtenido de la destilación de petróleo, siendo un compuesto denominado “medio”. Tiene una densidad de aproximadamente $0,850 \text{ gr/cm}^3$ a temperatura ambiente y un poder calorífico inferior es de 45 MJ/Kg . El gasóleo está compuesto por una mezcla de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas) al 75-65% y de un 25-35% de hidrocarburos aromáticos (naftalenos y bencenos), todos ellos están formados por en torno a 13 y 18 átomos de carbono, Tiene un índice de cetano de 50. Su temperatura de ebullición a presión atmosférica es de $182 \text{ }^\circ\text{C}$, obteniéndose el 50% de destilación a $298 \text{ }^\circ\text{C}$ y el 90% a la temperatura de $357,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Con respecto a los materiales contaminantes que contiene, el gasóleo tiene alrededor del 0,2 y 0,5 en porcentaje de peso de contenido de azufre. [31]

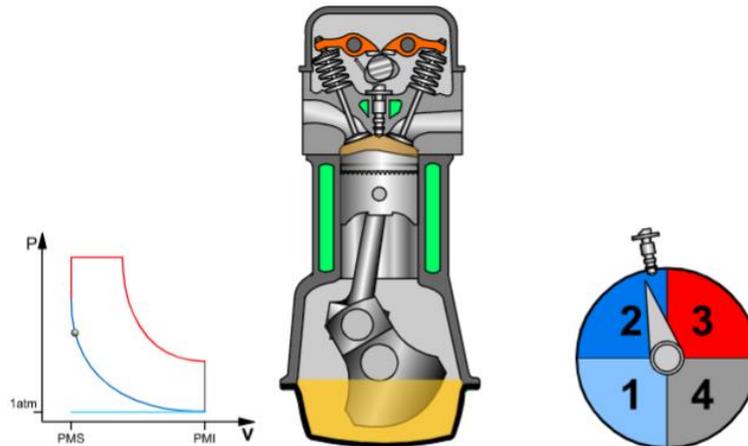
Los ciclos diésel están compuestos por cuatro procesos ideales: compresión, combustión, expansión y escape. En la realidad es más complicado, a continuación, se explicará cómo trabaja un motor diésel de forma real:

- **Admisión:** se produce una admisión de aire a presión atmosférica que llena toda la cámara de combustión como se puede ver en las ilustraciones 5.1. En los diagramas P-V de las figuras se puede ver que es un proceso isobárico, a presión constante, en el que se pasa del punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI).



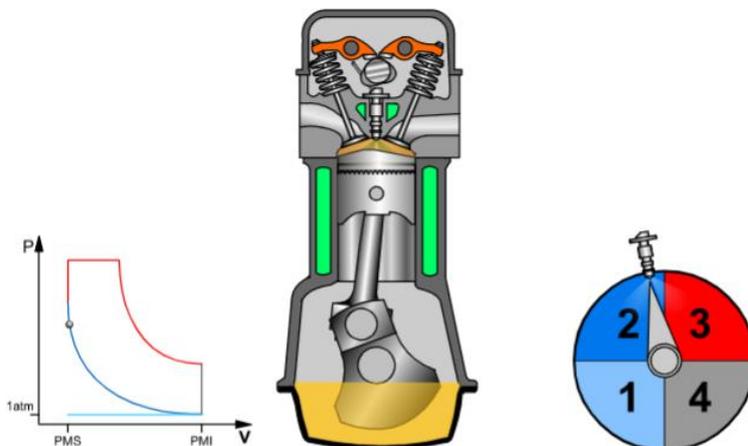
5.1 Ilustraciones de etapa de admisión en un motor diésel. Fuente: [32].

- **Compresión:** una vez alcanzado el PMI y cerrada la válvula de admisión, el cigüeñal, que sigue girando, empieza a comprimir el aire hasta llegar a la presión (el punto del diagrama donde cambia de color la gráfica) necesaria para la auto ignición del combustible al ser introducido en tal atmosfera. Este proceso es adiabático, es decir, no hay transferencia de calor.



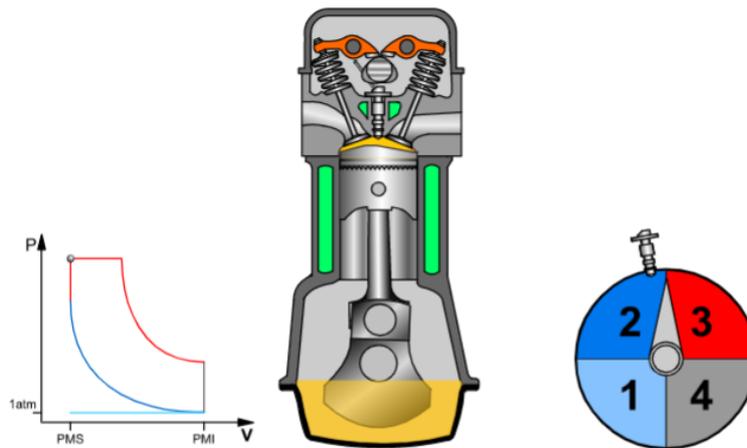
5.2 Ilustración de etapa de compresión en un motor diésel. Fuente: [32].

- **Inyección:** justamente unos instantes después de que el pistón comprima todo el aire (alcance el PMS, el punto más alto del diagrama P-V), se inyecta el combustible mediante uno o varios pulverizadores. El combustible se introduce de esta forma para que las moléculas de este se asocien con las del oxígeno del aire, ocupando todo el volumen de la cámara de combustión, en una mezcla aire-combustible lo más homogénea posible.



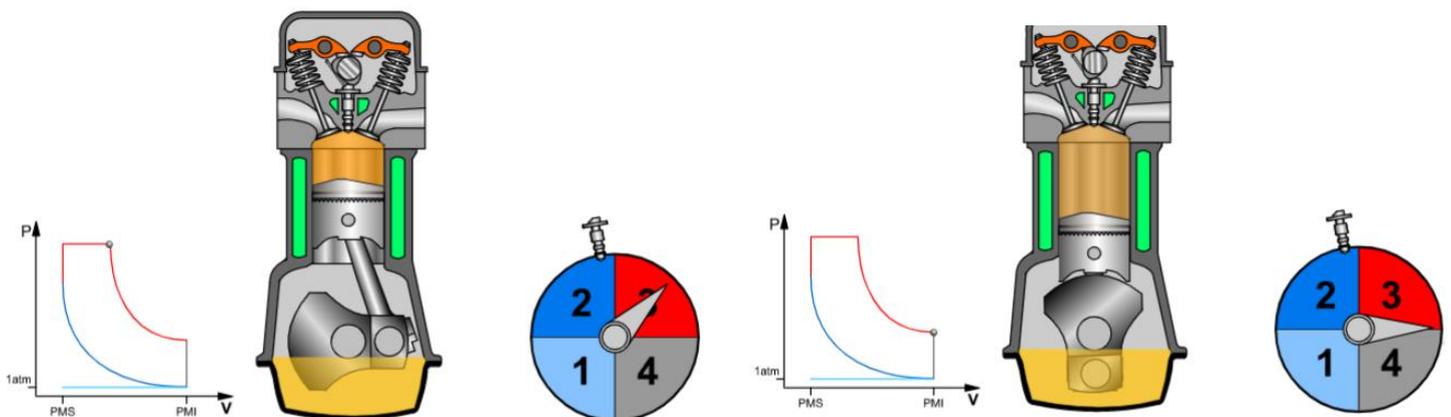
5.3 Ilustración de etapa de inyección en un motor diésel. Fuente: [32].

- Combustión:** este es un proceso automático ya que no se necesita ningún sistema auxiliar para provocar la detonación, a diferencia de los motores de ciclo Otto. El diésel, en contacto con el oxígeno del aire y el ambiente de alta presión, inicia espontáneamente su combustión, propagándose por toda la mezcla. La temperatura y la presión aumentan en un primer momento, al tener el diésel una velocidad de ignición alta. La combustión de la mezcla continua, aumentando el volumen a presión constante.



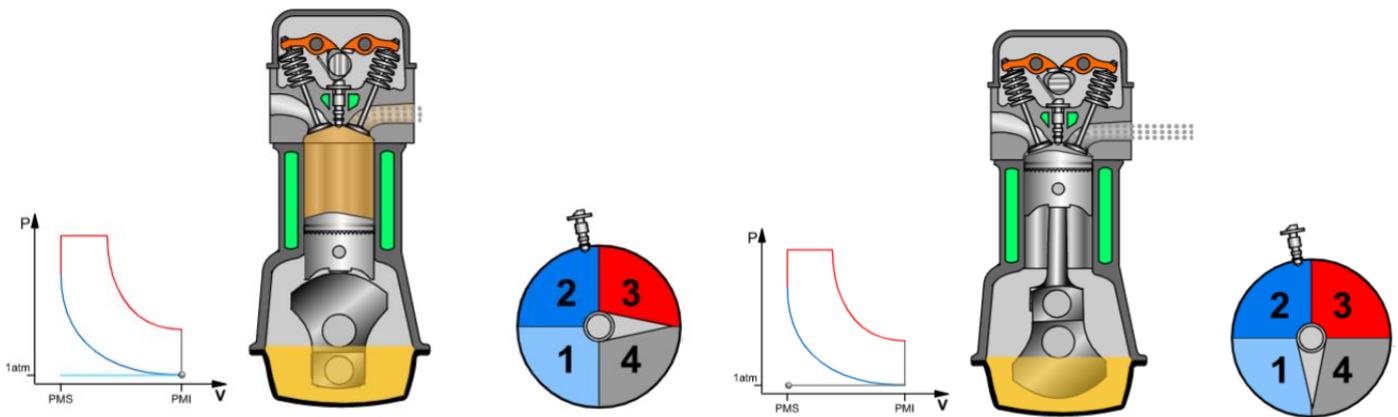
5.4 Ilustración de etapa de combustión en un motor diésel. Fuente: [32].

- Expansión:** llega un momento que la mezcla ocupa tanto volumen que hacen que el pistón caiga hasta el PMI, lo que provoca una transmisión de energía mecánica al eje por parte del motor. Este proceso es adiabático, ya que no existe transmisión de calor.

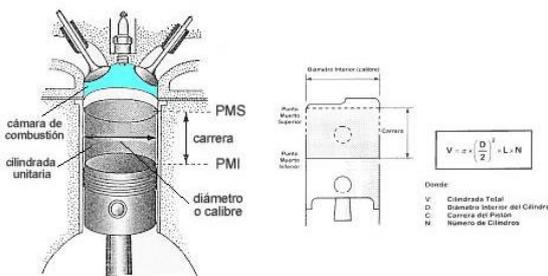


5.5 Ilustraciones de etapa de expansión en un motor diésel. Fuente: [32].

- **Escape:** cuando el pistón alcanza el PMI, la válvula de escape se abre para expulsar los gases de la combustión perdiendo toda la presión al inicio de la apertura y quedando expuesta la cámara de combustión a la presión atmosférica. Mientras que el pistón vuelve al PMS, por acción del movimiento del cigüeñal, éste va empujando los gases excedentes de la combustión hacia la válvula de escape. Este proceso de pérdida de volumen se origina a presión constante. El motor está ahora preparado para repetir el ciclo. [30] [31] [32]



5.6 Ilustraciones de etapa de escape en un motor diésel. Fuente: [32].



Punto muerto superior (PMS): posición del pistón más próximo a la culata.

Punto muerto inferior (PMI): posición del pistón más alejada de la culata.

Diametro: es el diámetro de la circunferencia del cilindro.

Carrera: es la distancia entre el PMS y el PMI. Es igual al doble del radio de giro de la manivela en el eje del cigüeñal.

Volumen total del cilindro: es el espacio comprendido entre la culata y el pistón cuando se encuentra en el PMI.

Volumen de la cámara de combustión: está comprendido entre la culata y el pistón cuando se encuentra en el PMS.

Cilindrada: es el volumen generado por el pistón en su movimiento alternativo desde el PMS hasta el PMI.

5.7 Ilustración que explica el funcionamiento en un motor diésel en vacío. Fuente: [33].

5.2.3 INTRODUCCIÓN ALTERNATIVAS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN.



Debido a la creciente conciencia ecológica de los consumidores y de las medidas gubernamentales, que solicitaban unos requisitos técnicos cada vez más acotados, la industria automovilística ha mejorado la tecnología de sus motores diésel en los últimos años. Sobre todo, con respecto a la contaminación, la cual ha progresado sustancialmente con los equipos de postratamiento de emisiones. Aun así, como se ha demostrado anteriormente, esto ya no vale, los demás combustibles alternativos están ganando peso ya que sus prestaciones técnicas son cada vez más parecidas a las de los combustibles tradicionales y, tanto los requisitos sobre emisiones contaminantes emitidas, la seguridad de suministro, su capacidad de hibridación, etc.... son mejores. La finalidad de este proyecto es analizar y estudiar teóricamente cada alternativa según unos criterios comunes y, al finalizar, se realizará una prueba empírica sobre los mismos criterios para demostrar si el uso de gases alternativos al gasóleo es viable. Primeramente, se propondrán dos caminos diferentes: la electrificación de las vías o el cambio de combustible. Como combustibles alternativos se analizarán tres: Gas natural Licuado (GNL), Gases Licuados del Petróleo (GLP) e Hidrógeno (H₂). A continuación, se describirán brevemente los criterios que se han seleccionado para la clasificación de cada uno de estos compuestos y más adelante se explicará en profundidad en que consiste cada uno y sus puntos fuertes y débiles, con el fin de poder demostrar cuál de ellos es el ideal, si es que hubiera uno.

En este estudio se proponen seis criterios para la evaluación de las alternativas:

- Características químicas y técnicas del combustible.
- Reservas mundiales y seguridad de suministro.
- Capacidad de hibridación.
- Adaptaciones necesarias.
- Seguridad de almacenamiento y de transporte.
- Consumo.
- Contaminación.

5.2 ELECTRIFICACION DE VÍAS.

Como se ha comentado antes, actualmente en España existen unos 5.600 km de vías convencionales de media/corta distancia aproximadamente sin electrificar. Vías por las que todos los días pasan trenes movidos por motores diésel, ya que no existe otra tecnología actualmente. La electrificación anual en las vías ferroviarias de ámbito nacional es del 1%, muy por debajo del porcentaje de electrificación de las líneas en el conjunto de Europa (60% de media). Esto se debe a que, hoy por hoy, no es una alternativa rentable ya que en España tenemos uno de los parques ferroviarios más viejos de la comunidad europea, aparte del coste de electrificar una vía que se construyó hace casi 100 años sin pensar en la catenaria eléctrica necesaria. [24] [20] [36]



El coste tanto de infraestructuras como las obras necesarias para llevar a cabo la electrificación en lugares donde nunca se predijo que fuese necesaria, sumados a los costes asociados por el cambio de los automotores requeridos para circular por vías electrificadas es altísimo, siendo solo rentables en corredores muy demandados, como pueden ser las vías de alta velocidad que conexionan Madrid-Barcelona-Sevilla en España.

Según el informe Deloitte de 2017, el coste de adaptar todas las infraestructuras para un ferrocarril totalmente eléctrico es de alrededor de los 10-12 mil millones de euros en los próximos 13 años, casi 6 veces más que adaptar toda la flota de vehículos hacia coches eléctricos o híbridos. “Por estos motivos, la electrificación, entre el análisis de inversiones consideradas necesarias para mejorar la competitividad del ferrocarril español (informe Deloitte 2017) supone una de las menos rentables como solución global (supone un 25% de total del capex para conseguir una mejora del 7% del coste del transporte)” Claudio Rodríguez, Vía Libre, 2018. [20] [34]

Otro dato que proporciona ADIF es el coste por kilómetro de vía electrificada: la electrificación de un kilómetro de vía cuesta de media unos 500.000€, teniendo en cuenta que la topografía del lugar puede aumentar estos costes. Además de cara, la electrificación no está claro que disminuya el nivel de contaminación, ya que, o el 100% del mercado eléctrico español es renovable o se generan emisiones de efecto invernadero indirectas al producir la energía necesaria para mover la locomotora en cuestión. Otro dato a tener en cuenta es que producir 1 kWh de energía eléctrica en nuestro sistema eléctrico se producen 0,385 kg de CO₂, por lo que la idea de que la electrificación es la mejor opción en todos los ámbitos no es la correcta, la electricidad es una de las fuentes de energía que más contamina ya que puede provenir enteramente de centrales de carbón, por ejemplo. [37] [10]

El informe Deloitte 2017: “Un modelo de transporte descarbonizado para España” apunta que alrededor del 40% de las emisiones de GEI se realizan en las ciudades, donde viven más del 60% de las personas en nuestro país. Como se ha dicho en la introducción, el medio de transporte más contaminante es el coche. Este informe propone, como ya se está haciendo en las principales ciudades europeas, que la prohibición del transporte privado por el centro de las ciudades venga de la mano de medidas que favorezcan el uso del ferrocarril, como medio de transporte para circular por ciudades. Aquí es donde los gobiernos, además de con leyes, deben de tratar de mejorar las infraestructuras de los ferrocarriles para conseguir vías con cero emisiones contaminantes. [10]

Dicho esto, este proyecto no realizará un estudio más exhaustivo sobre el proceso de la electrificación ya que, como se ha descrito, el objetivo de este trabajo es encontrar un combustible gas alternativo que cubra los requerimientos de potencia y sea más limpio en sus emisiones, sin olvidar que debe ser una opción económica. En el capítulo final, en las conclusiones, se expondrán los cálculos pertinentes para demostrar que esta



solución no es viable para una vía ya construida, teniendo que cumplir el requisito de ser una alternativa económicamente viable.

5.3 GAS NATURAL LICUADO (GNL).

5.3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.

El gas natural es un compuesto químico formado por una mezcla de hidrocarburos, en su gran mayoría de metano (CH₄), que se encuentra a altas presiones en las llamadas rocas almacén, formaciones geológicas porosas y estancas de la corteza terrestre. El metano está compuesto por un átomo de carbono unido por enlaces simples a 4 átomos de hidrógeno. La principal característica del metano es que presenta la mayor relación H/C de todos los hidrocarburos, lo que al combustionar genera muy poco CO₂ y CO. El gas natural distribuido en España es incoloro e inodoro, sin toxicidad, con una densidad específica promedio de 0,610 y un poder calorífico superior promedio de 11,7 kWh/m³ (47.000 kJ/kg), según datos de Enagás del gas distribuido en España durante el primer trimestre del año 2019. La composición del gas natural varía según su procedencia:

Composición aproximada de gases naturales

	Libia	Francia	Holanda	Gran Bretaña	Italia	Argelia	
	Marsa el Brega	Lacq	St. Faust Meillon	Groningen	Leman Bank	Cortemaggiore	Arzew
Metano	66,2	69,2	77,8	81,5	92,0	95,9	82,1
Etano	19,8	3,3	3,6	2,7	3,5	1,4	12,4
Propano	10,6	1,0	1,2	0,5	0,7	0,4	3,7
Butano	2,3	0,6	0,9	0,1	0,3	0,3	1,4
Hidrocarb. superiores	0,2	0,5	1,7		0,3		0,2
Nitrógeno	0,9	0,6	0,4	14,5	2,9	1,8	0,2
Anhídrido carbónico		9,6	8,5	0,7	0,3		
Acido sulfhídrico		15,2	5,9				

	Alemania Occ.	Venezuela	U.S.A.	N. Zelanda	U.R.S.S.	
	Emsmündung	Mara-caibo	Gulf Coast	Kapuni	Dachava	Kouibychev
Metano	81,8	78,1	93,5	44,2	98,0	74,6
Etano	2,8	9,9	3,8	6,1	0,7	
Propano	0,4	5,5	1,2	3,4		10,0
Butano	0,2	2,8	0,6	1,6		10,5
Hidrocarb. superiores		2,1		0,4		
Nitrógeno	14,0	1,2		0,1	1,2	3,1
Anhídrido carbónico	0,8	0,4	0,5	44,2	0,1	0,2
Acido sulfhídrico						1,6

5.8 Tabla que muestra la composición aproximada del GN con respecto su procedencia. Fuente: [31].

Como se puede observar, y se hará más hincapié más adelante, el contenido de azufre y nitrógeno del gas natural es muy bajo y en algunas ocasiones nulo, lo que es una ventaja a la hora de contabilizar la contaminación las emisiones de GEI. Hay que tener

en cuenta que el biogás se debe tener en cuenta dentro de los datos del gas natural.
 [38] [39] [40] [41]

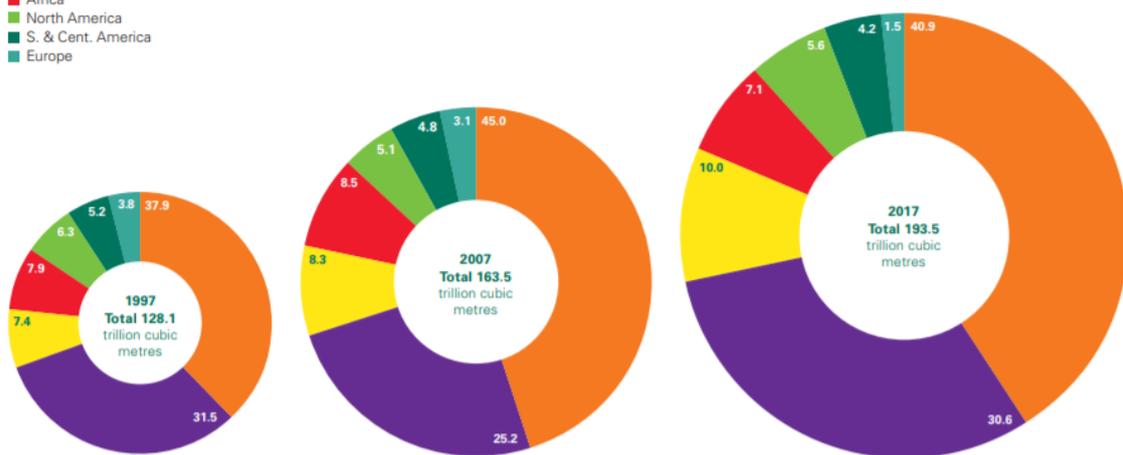
5.3.2 PRODUCCIÓN Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.

5.3.2.1 Reservas mundiales

Desde finales de los años 90, las reservas probadas de gas natural han aumentado alrededor de todo mundo. En 2018 se calcularon 194,5 trillones de metros cúbicos en reservas de gas en todo el mundo, distribuido de la siguiente forma: América del Norte 5,6%, América del Sur y Central 4,2%, Europa 1,5%, CIS 30,6%, países del medio este 40,9%, África 7,1% y Asia 10%. Dentro de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) se encuentran el 9,2% de todas las reservas probadas de gas, dato para tener en cuenta a la hora de evaluar la seguridad de suministro de este combustible. En 1997 las reservas probadas de gas natural eran 128,1 trillones de metros cúbicos, lo que supone un aumento del 65%, por lo que se puede asegurar que es una fuente de combustible fósil estable y con un futuro prometedor a largo y corto plazo. [42]

Distribution of proved reserves in 1997, 2007 and 2017
 Percentage

- Middle East
- CIS
- Asia Pacific
- Africa
- North America
- S. & Cent. America
- Europe



5.9 Distribución de las reservas probadas en 1997, 2007 y 2017. Fuente: [42].



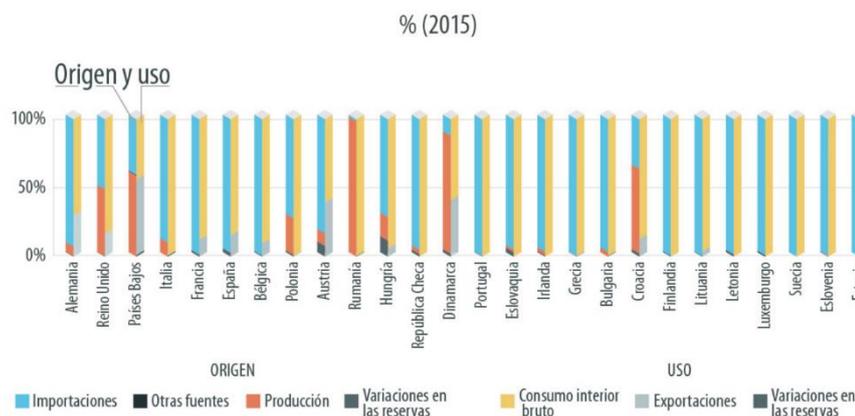
5.3.2.2 Producción mundial

En la tabla 5.10 se muestran las reservas probadas, la producción y el consumo mundial de gas natural por países. En este punto podemos observar varios matices que ayudarán a entender un poco mejor el mercado del gas natural. Anteriormente se ha visto que Estados Unidos tenía un porcentaje de reservas probadas del 4,5% sobre el total, ese mismo año (2017) produce un total del 20% de gas natural y consume 20,1%, un poco más de la totalidad que genera, haciéndose prácticamente autosuficiente de esta fuente de energía. En contraposición tenemos a Irán, otra potencia en la producción de gas natural y el cuál tiene una guerra comercial con EE.UU. por culpa de otros motivos ajenos a esta investigación, con unas reservas probadas del 17,2%, produciendo el 6,1% y consumiendo un 5,8% del total mundial. Rusia, uno de los principales proveedores de gas natural de Europa, produce un 17,3% sobre el total, con el 18,1% de las reservas mundiales y consumiendo una cifra menor de 11,6%. Dentro de los productores europeos cabe destacar a Noruega, también uno de los principales suministradores de gas natural de Europa, con una producción cercana al 3,3%, con unas reservas probadas del 0,9% sobre el total y suponiendo un consumo ínfimo. Con respecto a la situación española dentro del mercado mundial de gas natural, interesa destacar dos países, de los cuales España se suministra generalmente, que son: Argelia (2,2% de reservas mundiales con producción del 2,5%) y Qatar (12,9% del total de las reservas mundiales con producción del 4,8%). Es importante destacar a Alemania y Reino Unido, dos países que, siendo los gigantes económicos de Europa, demandan la mayor parte del gas en la zona europea pero que no tienen producción propia, lo que les supone un gran desembolso para importación de este combustible. Por último, cabe destacar un yacimiento nacional en Viura, La Rioja, que contiene unas reservas de hidrocarburo de 3.000 millones de m³, equivalentes al 10% del consumo anual de toda España. El yacimiento está dirigido por un consorcio formado por Sociedad de Hidrocarburos de Euskadi, Oil Gas Skills y Unión Fenosa Gas. Este depósito de gas representa más del 90% del gas disponible en la corteza terrestre del territorio nacional. [42]

ZONA GEOGRÁFICA	RESERVAS PROBADAS (%)	PRODUCCIÓN (%)	CONSUMO-DEMANDA (%)
América del Norte (EEUU)	5,6 (4,5)	25,9 (20)	25,7 (20,1)
América Central y Sur	4,2	4,9	4,7
Europa (Noruega) (España) (Alemania) (Reino Unido)	1,5 (0,9) (-) (-) (-)	6,6 (3,3) (-) (-) (-)	14,5 (0,1) (0,9) (2,5) (2,1)
CIS (Rusia) (Turkmenistán)	30,6 (18,1) (10,1)	22,2 (17,3) (1,7)	15,7 (11,6) (0,8)
Oriente Medio (Irán) (Qatar)	40,9 (17,2) (12,9)	17,9 (6,1) (4,8)	14,6 (5,8) (1,3)
África (Argelia) (Nigeria)	7,1 (2,2) (2,7)	6,1 (2,5) (1,3)	3,9 (1,1) (-)
Asia y Oceanía (China) (India) (Japón)	10 (2,8) (0,6)	16,5 (4,1) (0,8)	21 (6,6) (1,5)

5.10 Tabla de elaboración propia. Fuente: [42].

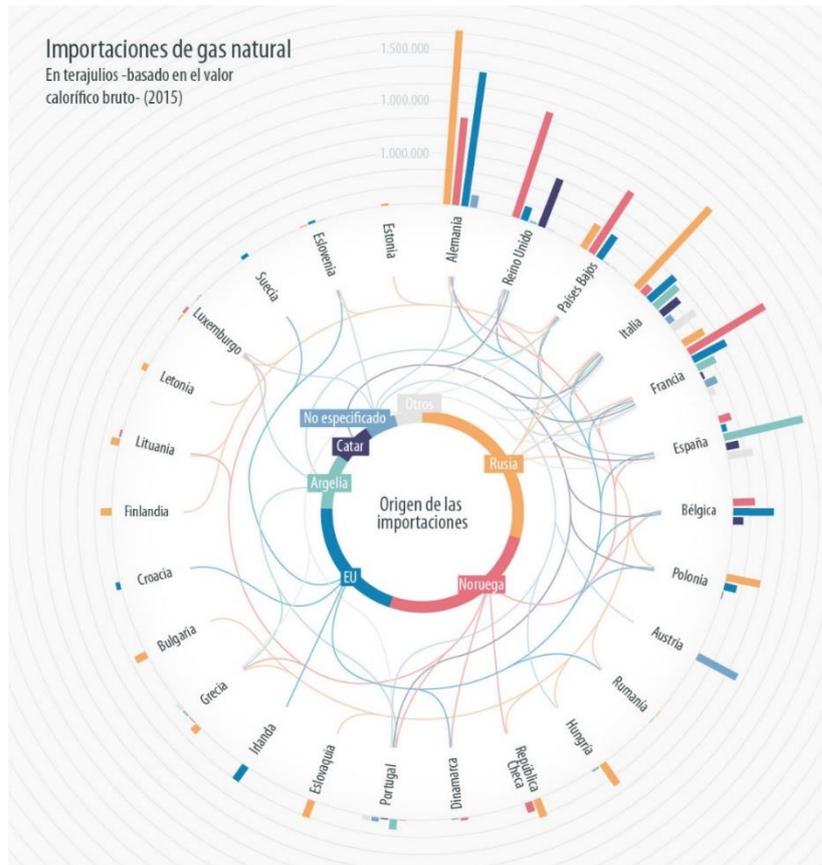
A continuación, se muestran dos imágenes, con datos correspondientes al año 2015. En la imagen 5.11 se demuestra el origen y uso del gas natural en cada país de la UE.



5.11 Gráfico del origen y uso del GN en los principales consumidores de este combustible. Fuente: [45].

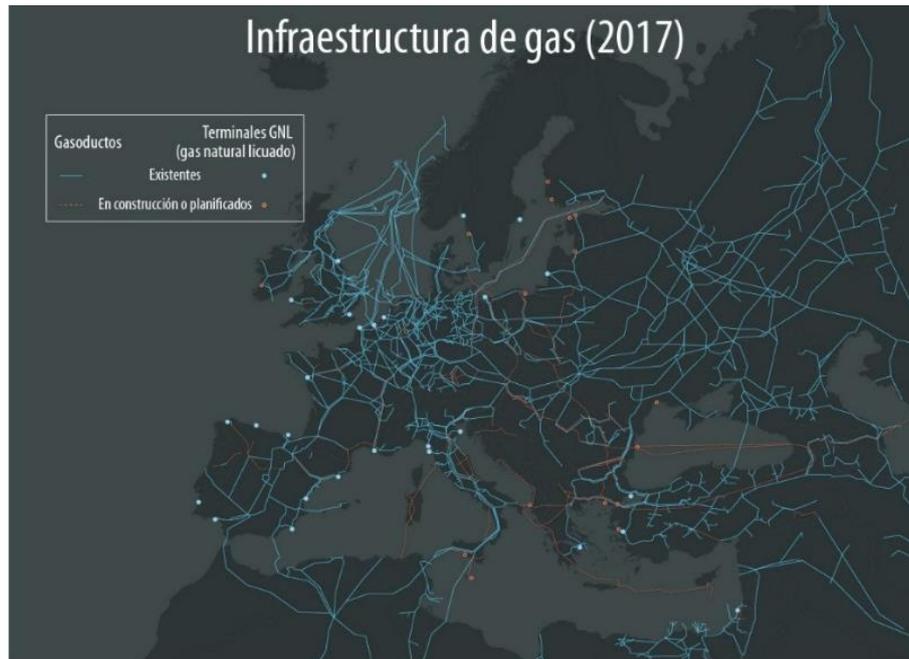
Destacando los datos de los países más importantes de Europa, se puede ver como Alemania tiene una fuerte dependencia de las importaciones de gas natural, pero a su vez destina alrededor de un tercio del total del gas a las exportaciones. Reino Unido importa la mitad del gas que consume y produce la otra mitad, destinando poco porcentaje de este a la exportación. El caso de España es extraño, ya que por localización e infraestructuras podría ser los principales proveedores para Europa de gas natural proveniente del norte de África. Lo que indican estas cifras es que, de todo el gas importado por España, alrededor del 90% es usado para consumo propio. [45]

En la figura 5.12 se identifica la procedencia de las importaciones europeas de gas natural, éstas se reparten casi en tres cuartos procedentes de Noruega, Rusia y Estados Unidos, el resto de Qatar, Argelia y otros países con una cuota menor. [42] [43]



5.12 Gráfico que demuestra las importaciones de GN, con respecto a su origen y país de destino. Fuente: [45].

A continuación, se muestra otra imagen en la que aparecen todos los gaseoductos en el territorio de la Unión Europea y el Norte de África, y las terminales de GNL, en las cuales se descarga el gas que es importado en los buques metaneros de otros lugares del planeta. Como se puede ver es una red densa y bastante desarrollada a simple vista, con un grado de sofisticación mayor en zonas estratégicas como son el Mar del Norte, el Mar Negro y las conexiones en las entradas a Europa: España, Turquía y Europa del Este. [43]



5.13 Imagen de los gaseoductos principales en Europa y el Norte de África. Fuente: [43].

5.3.2.3 TRASFONDO POLÍTICO

Para entender un poco mejor la situación del mercado del gas natural en Europa y en el mundo es necesario acudir a la sección de noticias sobre este tema en los últimos años. Como se ha visto en este capítulo, Europa consume el 14,5% con una producción del 6,6% del total mundial, lo que nos supone unos volúmenes de importaciones altísimo. Se ha demostrado que la mayor parte del gas que consumimos en Europa viene de Argelia (Sur de Europa), Qatar y Rusia (suministradores principales del Este de Europa) y Estados Unidos (suministra gas a la mayoría de los países europeos). Según la empresa rusa Gazprom, el país importó a Europa 193.000 millones de metros cúbicos de gas en 2017, aumentando así un 8,1% y llegando a alcanzar el 35% de las exportaciones de gas que se realizan a Europa. Además de estos datos, la directora de exportaciones de la empresa aseguró que ya se ha construido más del 20% del gasoducto que conectará Rusia con Europa desde el Mar Báltico, aumentando de esta manera hasta casi los 200.000 millones de metros cúbicos anuales. Desde la Unión Europea se está invirtiendo en la construcción de un gasoducto, que entrará en funcionamiento en 2020 y suministrará 10.000 millones de metros cúbicos de gas anuales, que conecte los pozos de Azerbaiyán (Mar Caspio) con Europa, atravesando Turquía como muestra la imagen 5.14. El objetivo principal de este movimiento es reducir de una forma notable la dependencia que tienen países como Alemania, Bélgica, Italia, Polonia, y demás países de su alrededor, del gas ruso. Aunque estas cifras sólo suponen alrededor del 5% del total de gas que importamos de Rusia, es una buena iniciativa para dejar de depender

paulatinamente del suministro de gas ruso. Por otro lado, Polonia también está construyendo un gasoducto que conecte sus costas con Noruega y a su vez está construyendo una plataforma flotando de regasificación, para poder aumentar la importación de gas noruego a Europa. [43] [46] [47]

EL CORREDOR DE GAS DEL SUR



5.14 Ilustración del corredor del gas del Sur. Fuente: [47].

Con respecto a otros países suministradores de gas natural se puede hablar de Estados Unidos, un país que ha dejado de depender en la gran medida en la que lo hacía del gas y del petróleo de países de oriente medio, postulándose como un país autosuficiente en el consumo de gas, ya que gracias a la técnica de extracción de gas “fracking” ha conseguido producir casi la misma cantidad que consume, un 20% de la producción global, como se ha visto en el anterior capítulo. Esto permite a este país ser uno de los principales exportadores de gas de la Unión Europea. Estados Unidos es el país con mayor rapidez de suministro de GNL por mar, lo que está utilizando en su favor al vender este gas a China, un gigante en auge económico. Pero los estadounidenses buscan que pase esto con muchos otros servicios que quieren vender a la clase media china, Por esto se ha desatado la guerra comercial entre estos dos países.

Estados Unidos está obligando a las marcas chinas a depender de empresas norteamericanas, por ejemplo, la negativa de Google a dar servicio a los móviles marca Huawei es un ejemplo de muchos, Por su parte China, que importaba grandes cantidades de GNL como medida anticontaminación, ha subido los aranceles de la entrada de este combustible del 10% al 25%, poniendo así contra las cuerdas la estrategia norteamericana, Lo que se saca de esto es que Estados Unidos ha podido



igualar el pulso con China en la batalla por el mercado mundial gracias a que tiene una producción inmensa de gas natural y unas buenas infraestructuras para distribuirlo por el mundo, que se han desarrollado en los últimos años.

Por otro lado, Estados Unidos tiene otro frente abierto contra Rusia y sus aliados por la guerra en Siria, como Irán, el cual está considerado como país terrorista número 1 en el país norteamericano, “Desde que asumió la presidencia, Trump ha puesto a Irán como uno de sus peores enemigos, quizás solo superado por los medios de comunicación de Estados Unidos, o el propio ISIS” Agustín Fontela, El diario.es, 2017. Estados Unidos está vetando económicamente al país persa mediante sanciones a terceros países que tienen actividades en el citado país, que es muy dependiente de los hidrocarburos. La supuesta amenaza nuclear del país persa y la posición de éste que es apoyado por el bloque oriental Rusia-China, permite al presidente Trump liderar la lucha contra este país para controlar una mayor cuota de los países cercanos a China y Rusia, que son competidores en el suministro de gas a Europa y en el mercado mundial. Por ejemplo, Estados Unidos ha importado 8.000 millones de metros cúbicos de gas a Europa, en aproximadamente un año, desde Julio de 2018, lo que ayuda a la Unión Europea a no ser tan dependiente del gas ruso. Para Europa es una buena noticia tener más vendedores de gas en el mercado ya que depender de un solo suministrador suele tener consecuencias negativas. Estados Unidos se aprovecha de que la Comisión Europea no confía en el suministro ruso desde 2014 con la crisis de Ucrania, para vender el gas bastante más caro que el ruso. [48] [49] [51]

Argelia es el principal socio de España en la compra de gas, teniendo cerca del 54% de la cuota total del gas natural que importa nuestro país. La relación de los dos países es fructífera en ambos sentidos ya que Argelia es el segundo socio comercial de España del continente africano, solo por detrás de Marruecos. Argelia es un “país económicamente dependiente del petróleo y el gas -que suman el 96 por ciento de sus exportaciones totales- cualquier frenazo en la producción y exportación de materias primas afectaría a sus tres principales socios -Italia, España y Francia- y por extensión a la Unión Europea.” Euroefe, 2019. [50]

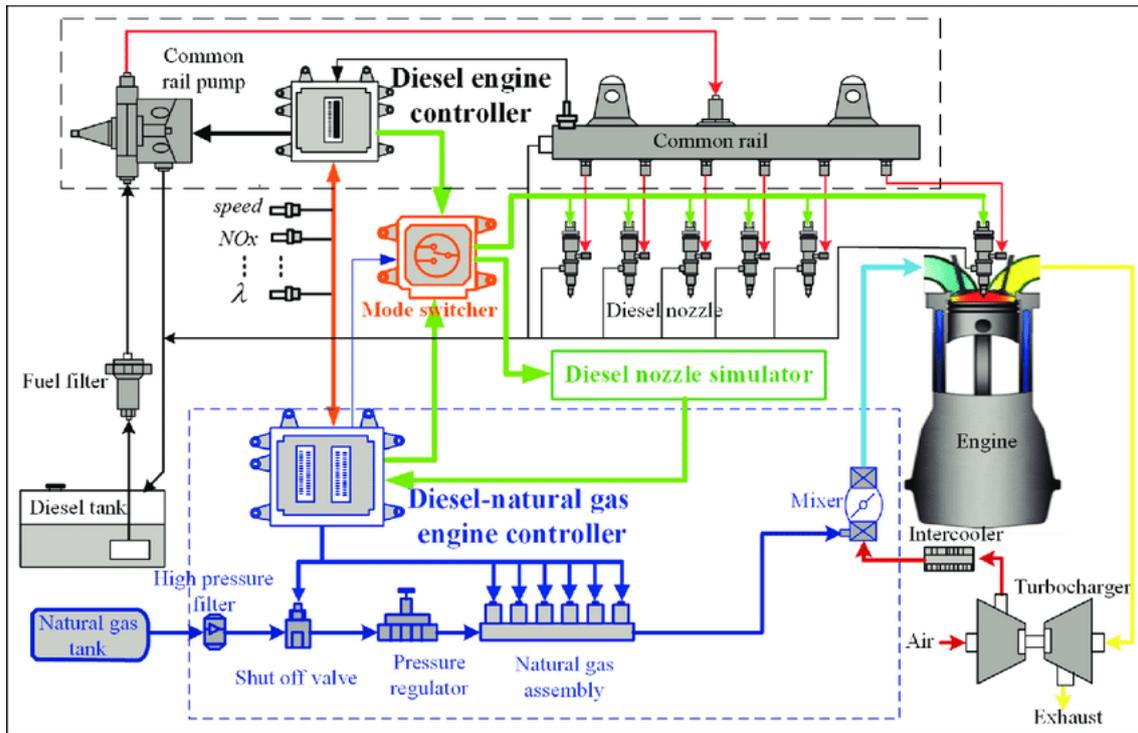
A modo de conclusión se puede afirmar que las principales economías del planeta se dieron cuenta en años anteriores que el gas natural podía ser un combustible de transición, más limpio y con prácticamente las mismas prestaciones que los combustibles fósiles convencionales. Esto ha hecho que, entre sus políticas, tanto internas como externas, se haya dado prioridad a crear una buena red de infraestructuras para importar, exportar y también producir gas natural, en los lugares que se pueda. Por lo tanto, la industria y mercado del gas natural está en pleno auge y al haber más productores de este combustible es más seguro su suministro.

5.3.3 CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.

En este apartado se va a desarrollar la idea de inyectar gas natural en estado gaseoso a un motor de ciclo diésel, sin tener que realizar mayores cambios que el sistema de almacenamiento y el de suministro de combustibles, ya que sería la opción más económica en motores de gran potencia. Primero se explicará cómo funcionan este tipo de motores, a continuación, las conclusiones obtenidas por los informes científicos y, por último, los cambios a realizar en el sistema de suministro del gas al motor.

Como ya se ha dicho anteriormente, el gas natural se ha convertido en una de las mejores alternativas a los combustibles tradicionales (diésel y gasolina) ya que tienen unas prestaciones muy parecidas y, además, mejoran las emisiones dañinas de elementos contaminantes como son el dióxido de carbono, óxidos nitrosos y óxidos de sulfuro. Este proyecto se ha basado en varios artículos que desarrollan este tema. Estos estudios empiezan a surgir a partir del comienzo de siglo XXI, en los cuales se demuestra la viabilidad de dicha sustitución de combustibles. Todos coinciden en que existe un condicionante claro, el gas natural en estado gaseoso dentro de un motor de ciclo diésel (encendido por compresión) no es capaz de realizar la autoignición. Por ello se necesita una inyección piloto de diésel, que trabaje como un iniciador de la combustión, para que ésta se transmita al combustible principal, que es el gas natural. Al principio los estudios proponían que la fracción de diésel a inyectar fuese de alrededor de más de un tercio de la mezcla total, pero, a medida que se ha ido mejorando la tecnología, se han reducido estos porcentajes. Hasta llegar a estudios que defienden una microinyección de 3% de diésel. En este proyecto se va a tomar por consenso que las mezclas entre combustible tradicional y alternativo sean 20% y 80%, respectivamente.

Para poder explicar cómo funciona un motor diésel con las características de los utilizados en el transporte ferroviario alimentado por gas natural, nos apoyaremos en investigaciones en las que se pone a prueba motores de ciclo diésel más pequeños. A continuación, se expone un esquema del diagrama de motor explicando cómo funcionan. [56]



5.15 Esquema de un motor bifuel alimentado por GNL y gasoil. Fuente: [56].

Estos sistemas no son mucho más complicados que un motor de ciclo diésel al uso y están compuestos por los siguientes elementos:

- Tanques de almacenamiento GNL: estos tanques contienen el gas natural en estado líquido a una temperatura de -220°F (-140°C). Estos depósitos están aislados de la mejor manera posible y con un máximo de llenado del 80% por norma para la seguridad, ya que, si el gas líquido se calienta, éste se evapora y ocupa más volumen. En la ilustración 5.15 aparecen dos tanques ya que siempre es mejor tener dos opciones de donde sacar el combustible, por si alguna de las dos fallase en un momento determinado tener la otra disponible en todo momento. Esto es muy común en sistemas de alimentación de combustible gas.
- Mezclador de combustible: en este paso del circuito, el gas natural, previamente despresurizado y por lo tanto en estado gaseoso, se mezcla con el aire aspirado y filtrado, junto con los gases provenientes del EGR System (sistema de recirculación de gases de escape), si es que nuestro sistema tiene este sistema.
- Inyector diésel: es una válvula controlada mediante un sistema electrónico que inyecta la cantidad necesaria de diésel a 200 bares de presión para realizar la combustión inicial, durante la fase de compresión.
- Demás sistemas tanto electrónicos como mecánicos de un motor, cuyo objetivo de este estudio no es describir.

Como ya se ha explicado anteriormente de forma resumida, el principio de funcionamiento de estos motores es muy parecido al de un ciclo diésel normal. En un

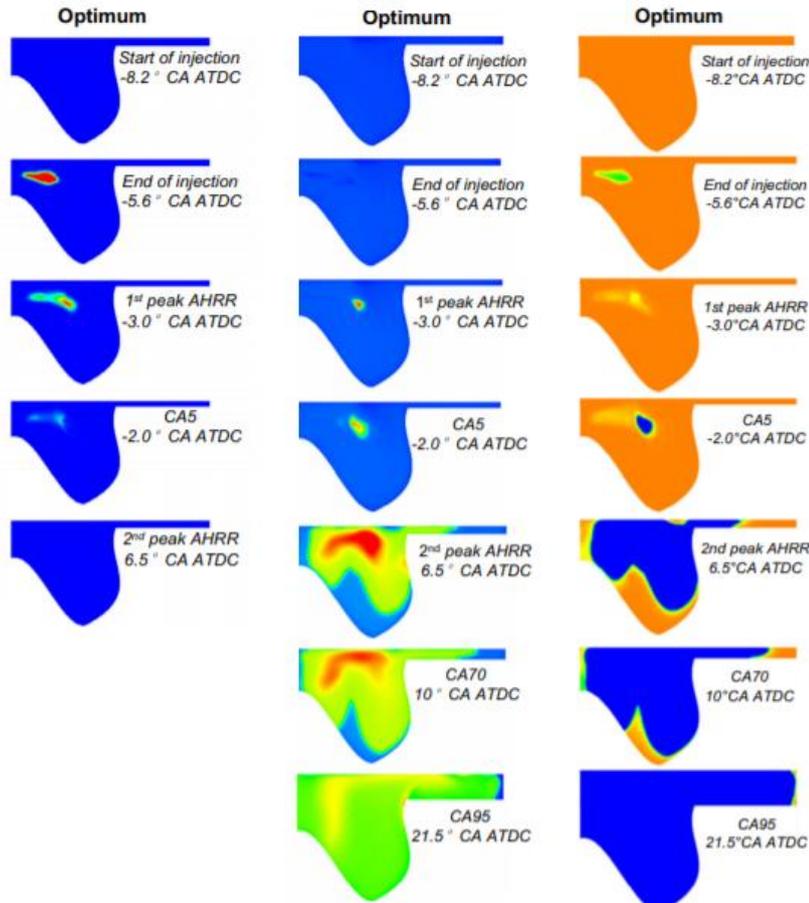


motor de inyección directa (ID), el gas natural (en estado gaseoso), es mezclado con aire, lo más homogéneamente posible, y se lleva a la cámara de combustión durante el primer paso del ciclo. Después, el cilindro comienza a realizar la compresión, aumentando así la presión y la temperatura de la mezcla. [52] [53] [54] [55] [56]

A continuación, a modo de “pistón” el inyector de diésel pulveriza una cantidad cercana al 20% del total de la suma de ambos combustibles (GNL+diésel), el cual, al entrar en la atmosfera ideal, combustiona, propagando la llama a través de todas las partículas de la mezcla anterior. A partir de aquí, el ciclo sigue de la misma forma que un ciclo diésel estándar. Hay estudios que proponen utilizar solo un 1% de diésel del total de la mezcla si se desarrolla previamente un estudio de la mejor geometría de la cámara de combustión para aprovechar cada centímetro de ella y cada molécula de combustible. Pero esto no ayudaría al motor a generar menos elementos contaminantes, por lo que, lo más sensato es realizar pruebas mediante software que permitan determinar cuál es la mejor mezcla de combustible para una determinada carga del motor, Una vez hechos estos ajustes, este estudio asegura que “en un motor alimentado por gas natural como principal combustible, las emisiones de NO_x pueden reducirse en un 30% en comparación con el motor diésel estándar. Además, los autores afirmaron que el metano no quemado representa aproximadamente el 90% de las emisiones de HC, mientras que las emisiones de CO se originan principalmente a partir de la extinción de la mezcla inicial de gas natural premezclado.” Por lo que se puede entender que el problema de los gases contaminantes es generado por la combustión incompleta del metano. Esto se podría mejorar incluyendo un sistema de recirculación de gases de escape, el denominado “EGR system”. Este sistema puede ser beneficioso para el motor ya que disminuye la presión interna del mismo, al sustituir O₂ por CO₂ y H₂O. También reduce notablemente (más del 50-80% logrado por la sustitución de diésel por gas natural) las emisiones de NO_x, incluso con una eficiencia parecida al motor alimentado por combustible diésel. Aunque este tipo de sistemas también tienen su lado negativo, ya que un motor diésel alimentado por gas natural y con sistema de recirculación de gases al 20%, aumenta la emisión de dióxido de carbono, comparándolo con un motor de ciclo diésel con alimentación de gas natural, pero sin sistema de recirculación. [52] [53] [54] [55] [56]

El uso del sistema EGR hace que un porcentaje de los gases no quemados que son expulsados se recirculen otra vez al motor, estando disponibles para el siguiente ciclo de combustión. Esto mejora la eficiencia térmica y también disminuye las emisiones contaminantes y las partículas emitidas, como se ha explicado en el anterior párrafo. También se disminuye la admisión de aire por parte del motor, mejorando la capacidad calorífica de la mezcla. Si la fracción de gases que son recirculados por el EGR supera un cierto porcentaje (suele ser alrededor del 40-50%) el sistema entra en un punto de inestabilidad y puede llegar a emitir más emisiones de GEI. [57] [60]

A continuación, se muestra cómo funciona la inyección diésel y el desarrollo de la combustión, en este tipo de motores:



5.16 Ilustración de las etapas de ignición en un motor de ciclo diésel en sistema bifuel. Fuente: [58].

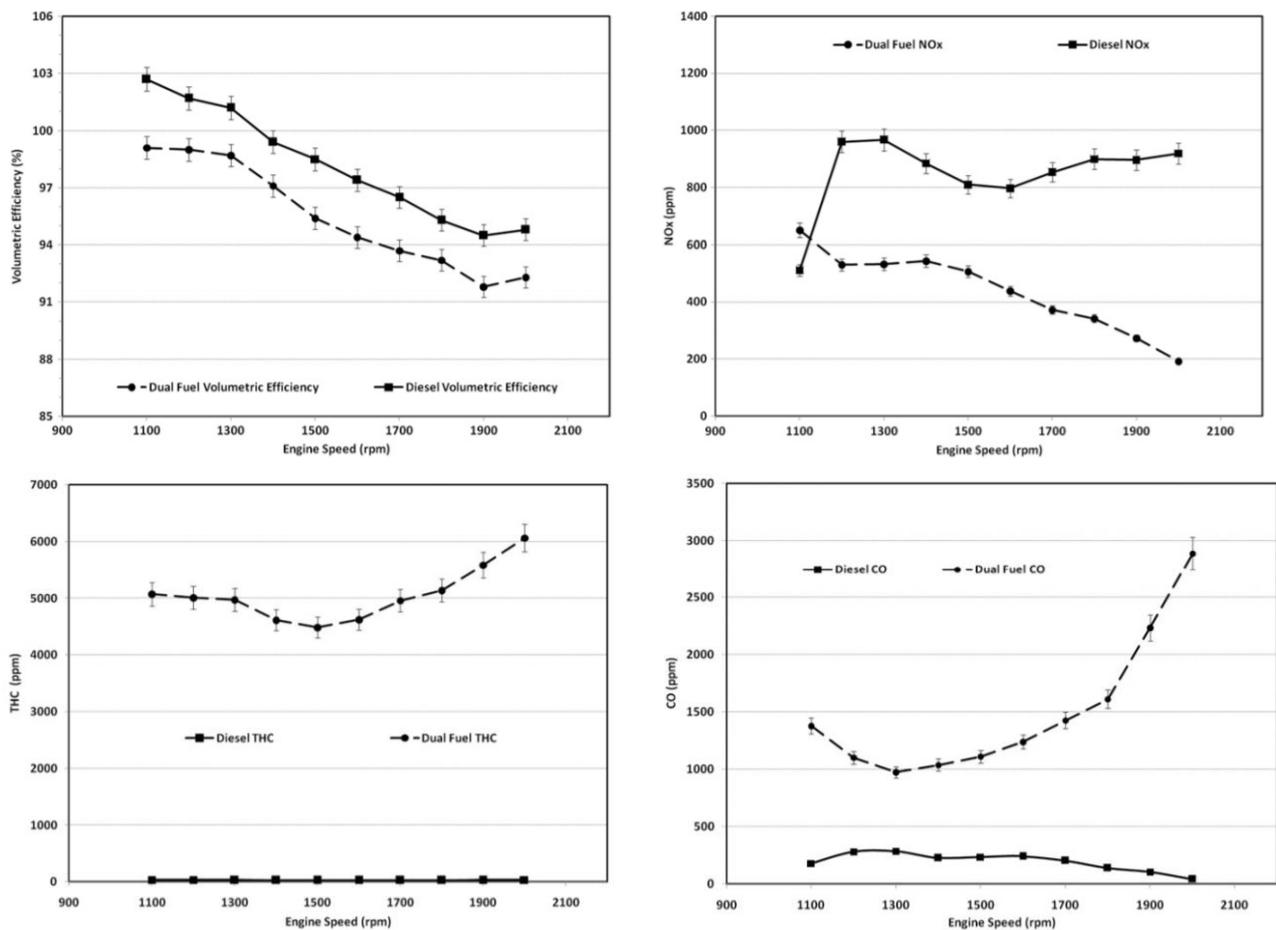
En la primera columna se encuentra representada la cantidad de diésel que se inyecta a la cámara de combustión, desde el inicio, inmediatamente después a la compresión, hasta la evacuación de gases. En la columna central se encuentra representada la temperatura de la cámara de combustión, en la que se puede observar cómo aumenta desde el momento que se introduce el spray de diésel. En la tercera columna de imágenes aparece representada la cantidad de metano que existe dentro de la cámara de combustión, desde la mayor concentración en color naranja a concentración casi nula en azul, al final del ciclo. [58]

Conclusiones sobre los efectos del uso de GNL en motores diésel, recogidos del total de estudios científicos encontrados sobre el tema en cuestión:

- Reduce 50-80 % emisiones de NOx, reduce casi a cero las partículas volátiles, reduce CO2 ya que el metano tiene menos contenido en carbono. Aumenta

considerablemente la emisión de CO y HC con respecto al combustible diésel, pero se puede disminuir modificando los tiempos de inyección del diésel. “La sincronización retardada de la inyección de gas natural a baja y una parte de las cargas del motor podría mejorar la propagación de la llama y mejorar la eficiencia de la combustión del gas natural. Sin embargo, la sincronización retardada de la inyección de gas natural bajo una alta carga del motor tiene un impacto negativo en el rendimiento de la combustión.” K. Cheenkachorn, C. Poompipatpong y C. Gyeung en Energy 53, Elsevier, 2013. [59]

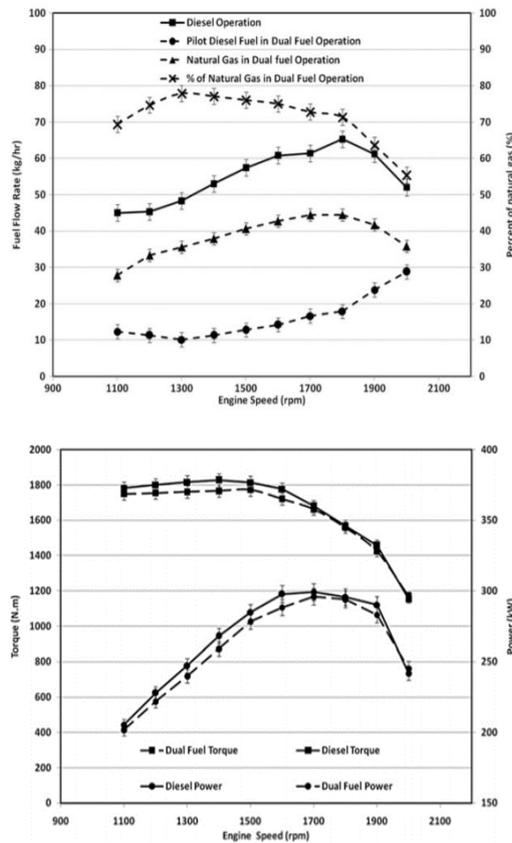
Esta técnica no es del todo beneficiosa ya que aumentarían las emisiones de NOx, y en cargas medias y altas, podría producir golpeteo de forma repentina. En las siguientes gráficas, [59] se puede observar lo comentado anteriormente. Se presentan los valores de par motor, eficiencia volumétrica, ratio de combustible y emisiones contaminantes frente a la potencia del motor, en función de la velocidad de giro de éste.



5.17 Gráficas de emisiones GEI en motor ciclo diésel sistema bifuel. Fuente: [59].

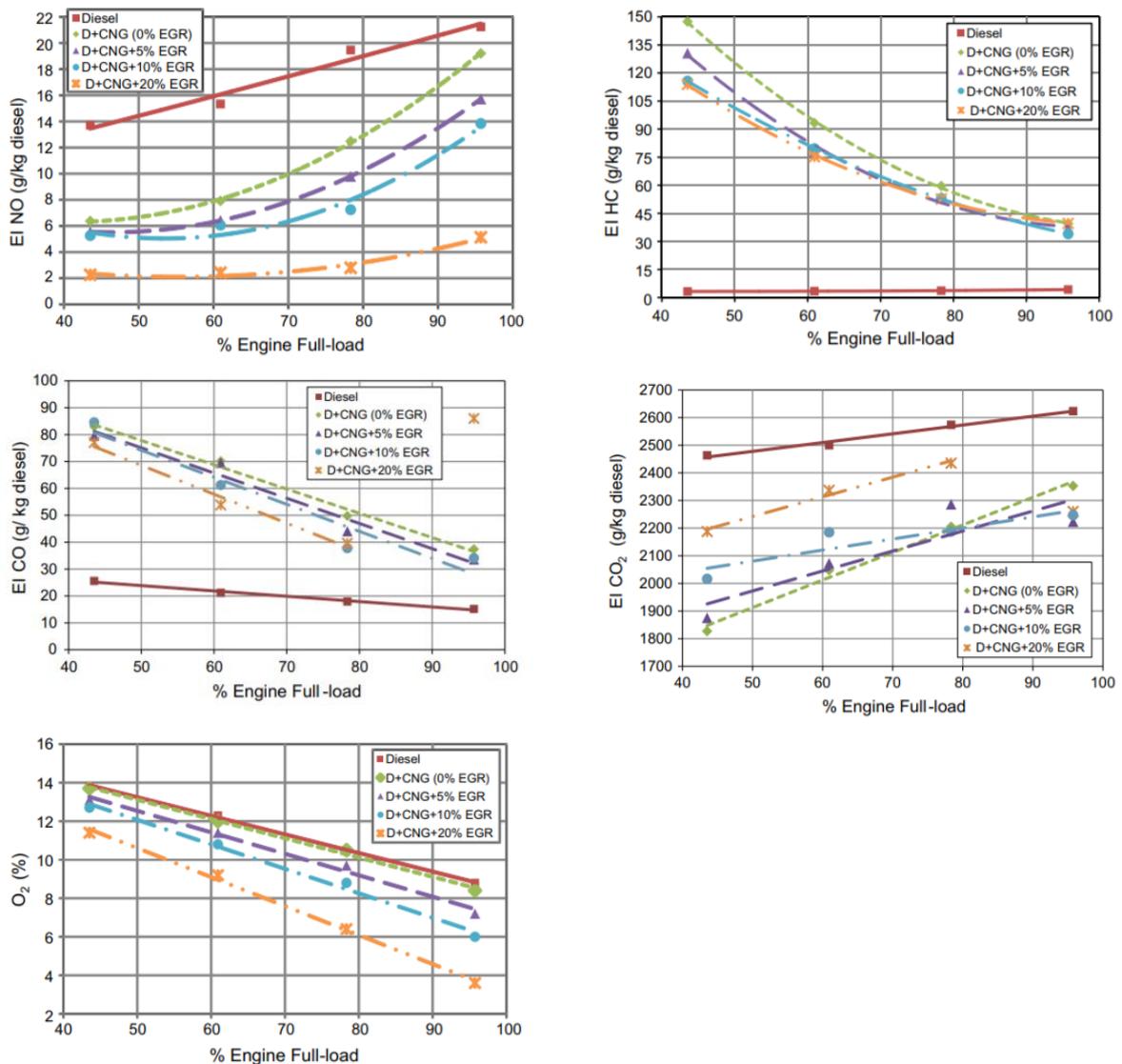


- Tiene un índice de octano alto, lo que determina una temperatura de combustión alta, En motores de alto índice de compresión es beneficioso ya que anula un problema típico de los motores de combustión interna: el golpeteo.
- Con cargas de motor altas, la eficiencia de la combustión es mayor que en los motores de ciclo diésel alimentados por combustible diésel, Pero en cargas parciales existe una pequeña disminución de la potencia del motor, También, con cargas parciales o bajas, la combustión dura más tiempo.
- La cantidad de diésel en la inyección se puede variar, Si se introduce una cantidad mayor a la establecida (recordemos que entorno al 17-20%), la eficiencia térmica del motor y el par saliente aumentan, Aumentar la cantidad de diésel también puede producir golpeteo en las fases iniciales de la combustión, a cargas altas, Aumentan también las emisiones de NOx, pero, a su vez, disminuyen los CO y los HC emitidos. [59]



5.18 Gráficas de emisiones GEI en motor ciclo diésel sistema bifuel. Fuente: [59].

- Motores diésel alimentados por combustible gas con sistema EGR: esta técnica permite reducir aún más el NOx emitido por el motor, reconduciendo los gases de escape al motor. El sistema EGR reduce la presión del interior del motor, lo que aumenta la vida útil del mismo, sustituyendo el oxígeno del aire aspirado por productos de la combustión. Es necesario adaptar dicho sistema a cada régimen de motor, ya que un EGR excesivo (a partir del 50% de la recirculación) podría dañar considerablemente las características de la combustión. El modo de combustible dual con EGR, en general, genera una eficiencia térmica comparable al modo diésel convencional. A continuación, se muestran gráficos con los datos obtenidos sobre los parámetros comentados anteriormente. [60]



5.17 Gráficas de emisiones GEI en motor ciclo diésel bifuel con sistema EGR. Fuente: [60].

5.3.4 SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE.

El gas natural se puede transportar de dos maneras: en estado gas o en estado líquido, Mediante tuberías subterráneas llamadas gasoductos, el gas natural es transportado en estado gaseoso, comprimiéndolo hasta una presión aproximada de unos 80 bares. En España, por ejemplo, tenemos una red gasista muy avanzada, que permite que el gas natural tenga un suministro seguro dentro del territorio nacional.



5.18 Red Gasista nacional con sus principales puertos y estaciones. Fuente: [61].

La otra forma de transporte se realiza mediante barcos, buques metaneros, los cuales almacenan el gas natural en estado líquido en su interior. Estos buques pueden ser de dos tipos: Kvaerner-Moss (estructura esférica) y membrana (transportado en el interior del casco).



5.19 Fotos de los diferentes buques metaneros. Fuente: [61].

Este tipo de transporte se utiliza para el movimiento de grandes masas de gas desde lugares remotos, como por ejemplo Estados Unidos, Sudamérica, Asia...etc. El gas debe licuarse previamente mediante el proceso de licuefacción, el cuál enfría el gas hasta una temperatura entorno a -160°C bajo cero, hasta que se transforma a estado líquido. Cuando los buques llegan a tierra deben de descargar el gas en las llamadas plantas de regasificación. En España existen seis: Barcelona, Sagunto, Mugaros, Bilbao, Cartagena y Huelva. [61]

Plantas regasificadoras en España

○ En funcionamiento ● En proceso



5.20 Plantas regasificadoras en España. Fuente: [62].

El almacenamiento del gas se hace en las propias plantas de regasificación, a la espera de que el sistema demande gas. El gas se contiene en grandes estructuras de hormigón con doble pared, una interior de acero y níquel, y otra exterior, de acero y hormigón prensado, con un aislante intermedio que mantenga la temperatura criogénica del gas,

para que éste no se evapore. Todos los recipientes que contengan gases derivados del petróleo (GN, GLP...) deben de seguir unas normas preestablecidas, tanto de llenado como de ubicación y manejo. Estas son: el RD 984/2015 y la UNE 60250 indican un dato importante que se tendrá en cuenta más adelante: llenado máximo del depósito al 95%, ya que es necesario dejar un volumen útil libre por si se produce la gasificación del gas natural. Otra forma de almacenamiento son los depósitos subterráneos. El gas se almacena en el subsuelo, aprovechando yacimientos antiguos, acuíferos o cavidades formadas por rocas salinas, para una demanda futura. El transporte al mediano y pequeño consumidor también se hace a través de camiones cisterna, los cuales son utilizados normalmente para suministrar este combustible a lugares donde la red de gasista no llega o tienen sus propios depósitos. [63] [64]

Como se verá más adelante, para este proyecto el sistema utilizado para el almacenamiento de gas natural será en tanques criogenizados en estado líquido con un volumen máximo del 95% de la capacidad máxima del tanque por normativa. “Para almacenar el GNL en las plantas satélite se utilizan depósitos de doble envoltante metálica, la interior de acero aleado y la exterior de acero al carbono, con un espacio intermedio relleno de perlita expandida y en el cual se ha efectuado el vacío. Los depósitos son siempre cilíndricos y pueden ser horizontales o verticales en función de las capacidades y necesidades de espacio. Normalmente se utilizan depósitos horizontales, pero para ciertas aplicaciones en las que por ejemplo deban alimentarse bombas criogénicas de gas natural licuado o por falta de espacio, convienen los verticales.” Planta satélite de GNL adaptada a “El Hierro 100% renovable”, Gonzalo de la Peña, 2014. [65]

Los depósitos que se van a proponer para el almacenamiento de GNL en este proyecto son los mismos que se utilizarían para una planta satélite de GNL, ya que la demanda entra dentro de la horquilla de suministro de estos depósitos. A continuación, se adjunta una imagen de un tipo de depósito de la serie 2200H de la empresa española LAPESA S. A. En la descripción se puede ver los materiales de los que está compuesto y de los volúmenes nominales que tiene:



SERIE 2200 H
 Ejemplo denominación "LC6H22-P05": LC: depósito criogénico lapesa, 6: volumen nominal 6 m³, H: instalación horizontal, 22: diámetro 2.200 mm, P05: presión máxima de trabajo 5 bar

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		LC5H22-P.*	LC6H22-P.*	LC11H22-P.*	LC16H22-P.*	LC20H22-P.*
VOLUMEN NOMINAL	m ³	5,0	6,0	11,0	16,0	20,0
VOLUMEN NETO	m ³	4,9	6,2	10,9	15,7	19,9
PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO	bar		* (P) : 05, 09, 13, 16, 22, 28, 35			
TEMPERATURA DE DISEÑO	°C	-196	-196	-196	-196	-196
NORMATIVA		marcado CE: Directiva Europea 2014/68/UE, (opcional) sello ASME: ASME VIII, div.1				
DEPÓSITO INTERIOR	material	acero inoxidable austenítico				
DEPÓSITO EXTERIOR	material	acero al carbono				
AISLAMIENTO		material aislante perlita, vacío < 5* 10 ⁻² mbar				
ACABADO INTERIOR		limpio de partículas				
ACABADO EXTERIOR		granallado SA 2 1/2 / imprimación epoxi poliamida 60 micras / acabado poliuretano blanco 60 micras				

5.21 Tanque de almacenamiento GNL serie 2200H de la empresa LAPESA S.A. Fuente: [66].

Es necesario tener en cuenta que el proceso de licuefacción del gas natural consume energía, al igual que la compresión, pero en mayor medida, se estima que aproximadamente el 10% de la energía interna de un volumen dado de gas natural se consume al licuar el gas. [67]

El gas natural presenta tres inconvenientes en el campo de la seguridad. Primero, en estado gaseoso, presenta una sensibilidad a la inflamación relativamente alta, lo que puede ser un problema en ambientes adversos. En fase líquida existen dos problemas potenciales, uno es la constante vaporización del GNL dentro de los tanques de almacenamiento, lo que hace aumentar la presión de confinamiento del recipiente. Por último, el gas natural en estado líquido presenta una grande densidad energética y una baja volatilidad durante los primeros momentos de una posible fuga, por lo que la mayor concentración del combustible puede llegar a resultar realmente peligrosa. Dicho esto, se puede considerar al gas natural licuado como un combustible seguro en su almacenamiento y con una madurez tecnológica con más de 50 años de experiencia, sin poder obviar los requerimientos de seguridad para su transporte y almacenamiento. [61] [65] [41]

5.3.5 ADAPTACIONES NECESARIAS.

El motor de ciclo diésel alimentado por gas natural necesita ciertas adaptaciones que aumentan su coste asociado. Los principales cambios y elementos utilizados serán los siguientes:

- Adaptación del depósito del tren: anteriormente se ha explicado el tanque necesario para almacenar GNL en tierra, pero ahora hay que definir el que va en el tren, que suministre al motor. Se puede utilizar el depósito que anteriormente contenía el combustible diésel, pero se deben hacer cambios en sus componentes para que éste pueda transportar gas natural licuado con garantía de seguridad. Como ya se ha explicado anteriormente, es importante aislar los depósitos que contengan el gas en estado líquido para prevenir aumentos de presión y así minimizar la vaporización, ya que esto nos puede causar tanto problemas técnicos como de seguridad. En este punto se propone cambiar el depósito disponible en las locomotoras por depósitos especiales para transporte de GNL, ya que puede llegar a ser más económico que intentar modificar uno existente. Un depósito de GNL ideal es de forma esférica, para una mejor adaptación del combustible, tiene varios medidores de presión y varias válvulas de llenado/vaciado, que se explicarán a continuación. Las siguientes imágenes corresponden a depósitos usados para transportar gas natural licuado en camiones que utilizan este sistema de motores duales. Se entiende que los usados en los ferrocarriles serán muy parecidos, sólo dependiendo de la demanda de nuestro trayecto, pero esto ya se verá cuando se llegue al apartado del trayecto ejemplo. Fotos de un depósito 250 litros IVECO Stralis NP 400 GNL. [61] [68]



5.22 Imágenes de depósitos GNL para camiones Fuente: [68].

- Válvulas asociadas al depósito de GNL: a continuación, se explicarán las válvulas y sensores utilizados en los depósitos de GNL. [55] [61] [65]
 - Válvulas de sobrepresión: existen dos válvulas que impiden que el depósito sufra una presión muy elevada, Son dos, una primaria a 16 bares y otra secundaria a 24 bares. Cuando el detector de presión mide presiones que están por encima de estos valores, se abren las válvulas respectivamente, venteando el gas natural en estado gaseoso para aliviar la presión del depósito, Lo ideal es diseñar el sistema para que en ningún momento pase esto ya que se perdería combustible.



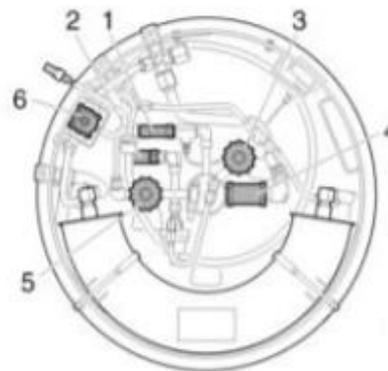
5.23 Válvula de sobrepresión. Fuente: [94].

- Válvula de corte manual: este sistema es utilizado para poder aislar el depósito de todo el sistema de forma manual. Se suele utilizar por problemas técnicos.



5.24 Válvula de corte manual. Fuente: [94].

- Válvula de corte de tubo: esta válvula impide que el gas natural en estado líquido se derrame si existe cualquier problema con los conductos de suministro de gas al motor.
- Válvula de corte manual del gas de retorno: en funcionamiento se encuentra cerrada. Es por donde se recarga el depósito.
- Válvula solenoide: es el sistema electromagnético que permite o no el paso del gas, desde el depósito hacia otros elementos del sistema, como pueden ser el vaporizador o el economizador. Son utilizadas a lo largo de todo el circuito y su función principal es suministrar gas al motor siempre que éste lo requiera.



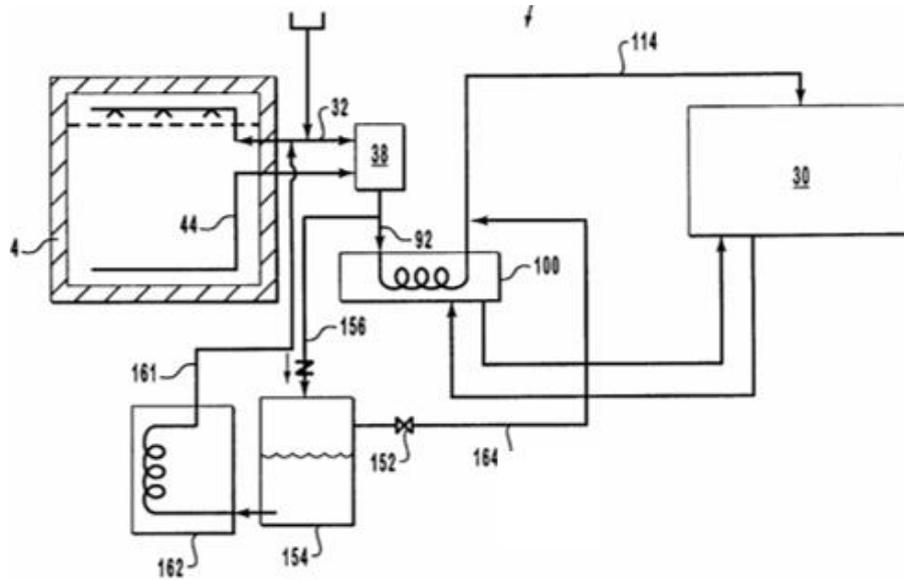
1. Válvula de sobrepresión primaria
2. Válvula de sobrepresión secundaria
3. Válvula de corte manual de combustible
4. Válvula de corte del tubo
5. Válvula de corte manual de gas de retorno
6. Válvula solenoide

5.25 Válvula solenoide (izquierda) y sistema de admisión (derecha). Fuente: [94] y [68].

- Sistema de admisión del motor: como se ha descrito brevemente en puntos anteriores, se necesita un sistema de admisión diferente al del combustible diésel, ya que se requiere vaporizar el combustible antes de introducirlo dentro del motor. Este sistema también encarecerá la operación, al ser necesarias válvulas y conductos nuevos. Para desarrollar este tema, este proyecto se ha basado en la publicación "SYSTEMS FOR DELIVERING LIQUIFIED NATURAL GAS TO AN ENGINE", Dennis N, Bingham; Bruce M, Wilding; James E, O'Brien; Ali S, Siahpush; Kevin B, Brown, 2000. [69]



Es un desarrollo de una patente donde primeramente se explica el proceso y después se muestran todos los pasos que da el gas, desde el depósito al motor. El funcionamiento de este sistema se basa en que el GNL está contenido en un depósito, con aislamiento de doble capa, a temperatura criogénica. Este depósito está conectado a un economizador, por medio de dos conductos, uno que conecta con la parte superior del depósito, donde se encuentra la porción gaseosa del combustible, y otro que conecta con la parte inferior del depósito, donde se encuentra el GNL. El economizador tiene una válvula con un sensor de presión y ésta puede trabajar de dos formas. Cuando la presión del tanque es menor de un valor de presión, el conducto que se abre es el que transporta el gas en estado líquido hasta el vaporizador. Si, al contrario, el tanque tiene una presión superior al valor estimado previamente, el conducto que suministra combustible es el que lo hace en estado gaseoso. El vaporizador es un intercambiador de calor, el cual transmite el calor de un refrigerante que sale del motor, con el gas natural licuado o en estado gaseoso. Esto hace que todo el gas pase a estar en estado gaseoso y se haga circular directamente al motor. Antes de entrar al vaporizador, una pequeña porción de gas es recirculada a través de otro vaporizador secundario, de menor tamaño, hacia el tanque de combustible. Esto se hace para poder controlar la presión del depósito, ya que si se extrae demasiado combustible en estado gaseoso la presión puede disminuir demasiado, haciendo bajar la temperatura y produciendo la vaporización del gas, pudiendo producir problemas en el depósito y en el sistema, ya que el gas natural en estado gaseoso ocupa 600 veces más volumen que el gas natural licuado. A continuación, se adjunta un croquis en el que se pueden ver todos los elementos constituyentes de este sistema de suministro de gas natural al motor. [69]



5.26 Esquema de sistema de admisión de gas en un sistema bifuel. Fuente: [69].

Elementos constituyentes del sistema de admisión de gas:

- 14- Tanque de combustible.
 - 30- Motor dual.
 - 32- Conducto gaseoso.
 - 38- Válvula del economizador.
 - 44- Conducto de gas licuado.
 - 92- Conducto que lleva el gas del economizador al vaporizador.
 - 100- Vaporizador.
 - 114- Conductos de alimentación de gas al motor.
 - 152- Válvula solenoide.
 - 154- Depósito secundario de gas recirculado.
 - 156- Conducto de recirculación de gas.
 - 161- Conducto que lleva el gas presurizado hacia el tanque de combustible.
 - 162- Vaporizador secundario.
 - 164- Conducto que lleva el gas que se ha vaporizado desde el 154 hasta el motor.
- Inyectores diésel: son los elementos encargados de pulverizar el combustible diésel dentro de la cámara de combustión. Suelen ser varios inyectores y son regulados por la bomba de combustible, la cual es una válvula electrónica que se abre cuando el motor está en funcionamiento.



5.26 Inyector. Fuente: Artículo 2019 infortallestv.es.

5.3.6 CONSUMO TEÓRICO CADA 100 KILÓMETROS.

En este apartado se va a calcular el consumo relativo de una locomotora ejemplo con un motor diésel modificado, operado por una mezcla de GNL y diésel. Sirve para demostrar cómo trabajaría un motor de ciclo diésel en sistema bifuel de una locomotora con las siguientes características. Cada combustible tendrá este capítulo, por lo que las condiciones de estudio serán las mismas, no tienen que ver con el caso práctica, en el que en su momento se especificarán los valores tomados. Los datos de partida son los siguientes: [70] [71] [72] [38]

- Recorrido: 100 km.
- Locomotora Diésel-Hidráulica serie 2600 RENFE (dos cabezas tractoras).
- Motor diésel de 222 cv.
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial).
- Mezcla de combustibles 80/20.
- Velocidad máxima: 85 km/h.
- Velocidad media en el trayecto: 70 km/h.
- Peso total tren: 26,420 kg.
- Perdida de potencia por uso de gas en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%.
- PCI diésel: 43.100 kJ/kg.
- PCI GNL: 47.000 kJ/kg.
- Densidad diésel: 0,835 gr/cm³=835 kg/m³.
- Densidad GNL: 431 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):



- (1) $P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}} \times \eta_{\text{pérdida por mod.}}$
- (2) Consumo diésel = $P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$
- (3) Consumo gas natural = $P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{gas natural}})$
- (4) Consumo total = $0,2 \times (3) + 0,8 \times (4)$

En la ecuación (1) se calcula la potencia real que tiene que aportar el combustible al motor diésel en la realidad, ya que, al perder fuerza debido al rendimiento térmico de los motores, por las modificaciones y por una pérdida, que se ha denominado parcial, en la que se quiere dar a entender que el automotor no está demandando el 100% de la potencia del motor todo el trayecto. Estos valores son orientativos y susceptibles de cambios dependiendo de cada situación, pero en este caso, para este proyecto, se ha tomado por consenso una media del 70% de la potencia nominal. Se recalca que estos datos son ideales o ejemplos para poder comparar consumos teóricos entre un combustible y otro. A continuación, se realizan las operaciones anteriores con los valores numéricos:

$$(1) P_{\text{real}} = 222 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 27,984 \text{ kJ/s.}$$

$$(2) \text{CD} = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 3,339 \text{ Kg diésel/100 Km.}$$

$$(3) \text{CGNL} = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg GNL}}{47.000 \text{ kJ}} = 3,062 \text{ Kg GNL/100 Km.}$$

$$(4) \text{CT} = 3,339 \times 0,2 + 3,062 \times 0,8 = 3,118 \text{ Kg de mezcla/100 Km.}$$

5.3.7 CONTAMINACIÓN.

Idealmente un hidrocarburo combustiona mediante el oxígeno presente en el aire, produciendo H₂O, CO₂ y energía en forma de calor. En los ciclos termodinámicos reales esto no sucede así, no solo producen agua y dióxido de carbono, sino que, también, otros productos tóxicos como son: monóxidos de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas de hollín (PM), La cantidad de estos productos emitidos no sólo depende de la calidad del combustible y de su naturaleza química, también depende de la eficiencia de la combustión, ya que las cantidades de combustible y aire que se admiten en el cilindro deben estar estudiadas a fondo para obtener un “timing” casi perfecto en la combustión del carburante para que no se produzcan pérdidas de potencia que desemboquen en emisiones de elementos tóxicos.



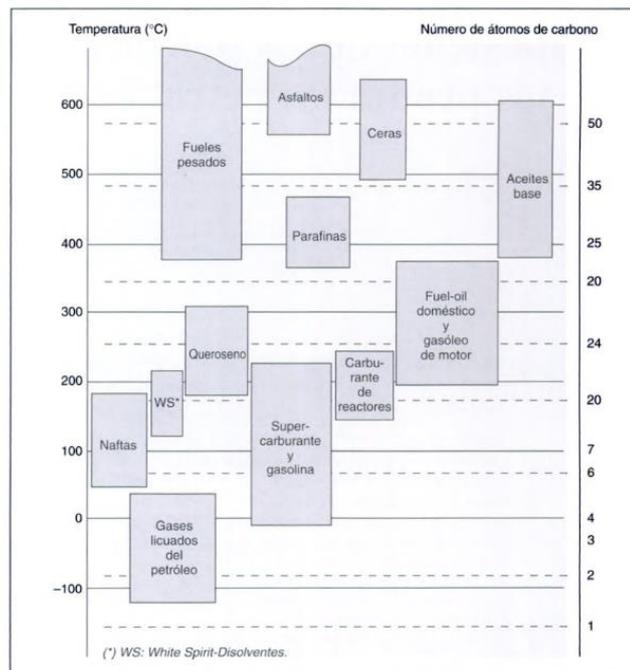
Como se ha expuesto anteriormente (apartado conclusiones de hibridación), este proyecto se ha apoyado en artículos científicos en los que se demostraba con experimentos empíricos cómo evolucionaban los productos de la combustión al alimentar a un motor de ciclo diésel con gas natural. Todos estos estudios están recogidos en la bibliografía de este proyecto. Recordemos las conclusiones generales:

- Reduce 50-80% emisiones de NO_x .
- Eliminación partículas volátiles PM.
- Aumentan emisiones CO y HC, aunque éstas se pueden mitigar modificando los tiempos de inyección.
- Utilización de sistema EGR (tratamiento de gases de escape): sustituye oxígeno del aire por productos de la combustión, lo que disminuye su concentración a la salida del motor: óxidos de nitrógeno -50%, partículas volátiles (PM) -10%.

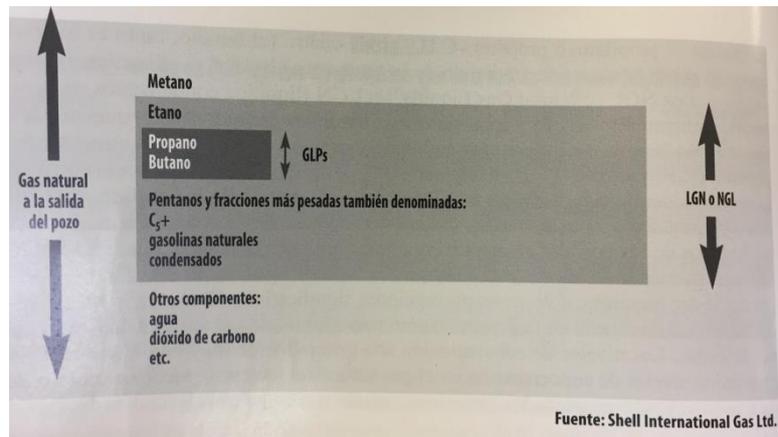
5.4 GASES LICUADOS DEL PETROLEO (GLP).

5.4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.

El GLP, siglas en castellano de gases licuados del petróleo, es una mezcla de varios tipos de gases hidrocarburos. Suelen estar formados por butano (C_4H_{10}) y propano (C_3H_8), Los denominados GLP son producidos de manera artificial por medio de diferentes procesos. Estos gases se encuentran junto con las reservas de hidrocarburos y al ser explotado un yacimiento pueden obtenerse directamente de la cadena de destilación del petróleo crudo o por extracción directa al encontrarse estos mezclados con gas natural en un yacimiento de gas. En un yacimiento de gas del 70% al 90% del producto recuperado es metano, a lo que denominamos gas natural. El restante depende del yacimiento y varía las concentraciones de los demás compuestos del 0% al 20% de concentración. A continuación, se muestran dos imágenes, la primera ilustra los diferentes tipos de productos del refino, según su temperatura y número de átomos de carbono, y la segunda representa los componentes del gas a la salida de un pozo de extracción.



5.27 Principales productos petrolíferos y sus intervalos de ebullición. Fuente: ENSPM-F1.

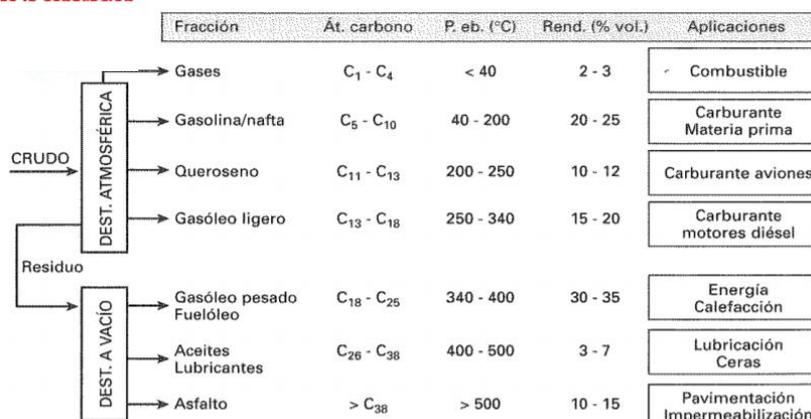


5.28 Productos a la salida de un pozo de GN. Fuente: Shell International Gas Ltd.

Las características principales de los gases licuados del petróleo son las siguientes. En su mayoría, los GLP procedentes de refinerías están compuestos por mezcla de 60% propano y 40% butano, lo cual les da unas características intermedias entre ambos. Son incoloros, inodoros y sin toxicidad. Su punto de ebullición es alcanzado a los -25,5 °C (-427 °F) a presión atmosférica, Su densidad relativa es de alrededor de 1,7 veces la densidad del aire. El PCI de los GLP es 11,082 Kcal/kg y el PCS es 12,052 Kcal/kg, Otra de las propiedades esenciales para el uso de este hidrocarburo de combustible, es que 1 litro en estado líquido equivale a, aproximadamente, unos 262 litros en estado gaseoso. Esto es importante ya que, como con el GNL, prácticamente obliga a ser un gas que se transporta y almacena en estado líquido, pero al que más tarde es necesario someter a un proceso de gasificación para introducirlo en la cámara de combustión junto con la porción de diésel. [31] [40] [61] [70]

5.4.2 RESERVAS MUNDIALES Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.

Como se ha descrito arriba, los GLP pueden provenir de dos procesos diferentes: del refino petroquímico del crudo (40%) o de procesos de separación del gas natural encontrado en los yacimientos (60%). Indistintamente de cuál es el camino para su conversión, se puede decir que la cantidad de GLP en nuestro planeta depende tanto de las reservas de petróleo como de gas. Como ya se ha contado, el gas que se encuentra en los yacimientos contiene de entre el 0% y 20% de butano y propano, por lo que las reservas mundiales de este combustible serán de entorno a esa fracción del total de gas natural en reservas probadas, indicado en el capítulo anterior sobre el GNL, y además habría que tener en cuenta la fracción del crudo que se puede transformar en GLP. Según las últimas publicaciones de los expertos en la materia del refino, se puede considerar de un 2% al 3% de contenido en gas (C₁-C₄) en el crudo del petróleo:



5.29 Principales productos petrolíferos y sus intervalos de ebullición. Fuente: [31]

Por las últimas afirmaciones, podemos presentar los GLP como una alternativa poco estable en función de su seguridad de suministro y reservas mundiales, tanto porque son productos secundarios de la manufactura de los hidrocarburos, como porque las reservas naturales de éstos son muy bajas en comparación con los combustibles tradicionales. No obstante, su uso y mercado se está multiplicando en las últimas décadas. Su uso está bastante desarrollado en el transporte por carretera, en los vehículos familiares. En España se han alcanzado los 85,000 vehículos movidos por GLP (tanto híbridos como únicamente de GLP) según datos de Repsol, recogidos por el periódico La Razón en su artículo "Los coches híbridos de gas ganan a los eléctricos" Julio, 2019.

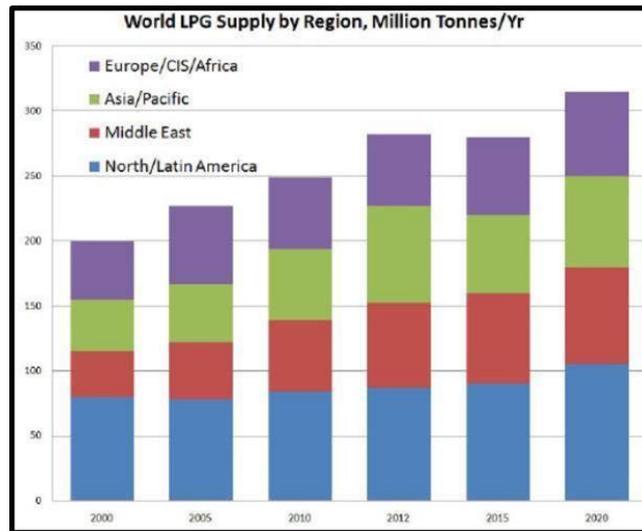
En la siguiente imagen, con datos del 2010, se pueden observar a los principales países productores y consumidores. Acorde con lo comentado más arriba, se asemeja mucho a los datos anteriores de producción y demanda de gas natural mundial.

**Principales países importadores y exportadores de gas LP en el mundo
 (Miles de barriles diarios)**

Países importadores			Países exportadores				
Lugar	País	2010	Lugar	País	2010		
1	Japón	397.0	1	Arabia Saudita	438.5		
2	Estados Unidos	196.7	2	Emiratos Árabes Unidos	235.5		
3	Corea del Sur	193.5	3	Argelia	205.4		
4	China	141.0	4	Noruega	195.9		
5	Turquía	95.3	5	Qatar	183.0		
6	India	94.5	6	Kuwait	112.4		
7	Francia	83.1	7	Estados Unidos	111.2		
8	México	81.4	8	Irán	107.2		
9	Egipto	70.9	9	Reino Unido	95.9		
10	Holanda	69.3	10	Nigeria	87.6		
Subtotal		1,422.7	60.1%	Subtotal		1,772.6	67.9%
Resto del mundo		943.7	39.9%	Resto del mundo		838.4	32.1%
Total		2,366.4	100.0%	Resto del mundo		2,611.0	100.0%

5.30 Principales países importadores y exportadores de GN. Fuente: [41].

El gráfico siguiente muestra la variación de suministro de GLP en el mundo desde el año 2000. Como se puede observar la demanda ha subido más de un 50% en todas las zonas del planeta, en especial en Latinoamérica y Asia, donde el transporte público y privado por carretera movido por GLP ha sido una muy buena alternativa para los vehículos mayoritariamente antiguos que circulan en estos países, tanto económicamente como en el aspecto medioambiental. [31] [40] [42] [61] [70] [73] [74]



5.31 Suministro de GN por continente en diferentes años. Fuente: [34].

5.4.3 CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.

La mayoría del uso que se le da a los GLP hoy en día en motores de combustión interna están centrados sobre el uso de gasolina más una fracción de GLP en vehículos particulares, ya que es el elemento más comercial para este tipo de combustibles. Aun así, existen variedad de estudios sobre el uso de este combustible en motores de ciclo diésel, el inconveniente de estos estudios para este trabajo es que están centrados en motores de baja potencia, en comparación con los usados en los trenes actuales en nuestro país. Esto condiciona las conclusiones obtenidas a la potencia del motor en cuestión. Desde este trabajo se va a dar eco a estas conclusiones, extrapolándolas a motores cuya potencia es mayor, es decir, ante la imposibilidad de disposición de datos sobre el uso de este combustible en motores diésel de alta potencia, se propone adoptar los resultados obtenidos en motores de media potencia para el funcionamiento de motores más potentes. A continuación, se hará un resumen de los resultados obtenidos por los diferentes estudios que han sido pilares de este apartado y que están citados en la bibliografía:



Fabián Alberto Sarmiento Ortiz y Milton Andrés Núñez Ramos, en su trabajo de fin de estudios [75] propusieron alimentar a un motor diésel de 2800 CC y 68 kW (4000 rpm) con tres mezclas de combustible diferentes, medir consumo, potencia a diferentes velocidades, material particulado y opacidad y comparar esos datos con los obtenidos con combustible diésel al 100%, las mezclas fueron: 80-20, 65-35 y 55-45% de diésel y GLP, respectivamente. Las principales conclusiones que obtuvieron en este estudio fueron las siguientes:

- Consumo: se realizó una prueba usando el ciclo IM 240 donde el motor recorría 3,2 kilómetros en 240 segundos y en la cual se alternaba entre los diferentes compuestos de GLP y diésel. Se realizaron 3 mediciones aleatorias con cada tipo de combustible para generar un promedio, que se encuentra en la figura a continuación, y cuyas conclusiones son que cuanto más se sustituye el diésel por GLP, menor consumo se genera. Este es un dato muy relevante ya que es una de las premisas para que la industria se decante por este nuevo combustible.

PRUEBA	BASE (L)	DIESEL+GLP 1 (L)	DIESEL+GLP 2 (L)	DIESEL+GLP 3 (L)
1	0.310	0.23	0.21	0.18
2	0.290	0.25	0.18	0.115
3	0.300	0.24	0.22	0.17
PROMEDIO	0.30	0.24	0.20	0.16

5.32 Consumo de combustible en 4 diferentes modos. Fuente: [75].

- Potencia: con relación a la potencia, se realizaron varias pruebas empíricas en el mismo motor con la diferencia de combustible comentada anteriormente. Se pueden observar dos aspectos importantes. El primero es concluir en que cualquier mezcla de GLP + diésel, desarrolla más potencia que el diésel en solitario, como se puede ver en la imagen. Por otra parte, a bajas revoluciones, existe un compuesto de máxima potencia entre las mezclas 2 y 3, ya que vemos que la potencia aumenta hasta la mezcla 2 y disminuye en la mezcla 3. Pero a partir del 1800 rpm (velocidad media en un motor diésel) la potencia del diésel se acerca cada vez más a la mezcla 1, y la mezcla 3 empieza a desarrollar más potencia que la mezcla 2, aunque están muy parecidas durante todo el experimento.



RPM	Potencia (HP)			
	BASE	DIESEL+GLP 1	DIESEL+GLP 2	DIESEL+GLP 3
	100 %	80.23+19.77 %	66.71+33.29 %	53.43+46.57 %
1000	6,17	5,77	8,70	8,57
1200	7,83	7,93	11,10	10,77
1400	9,73	9,73	13,47	13,30
1600	11,23	11,40	15,27	15,37
1800	12,53	12,63	17,07	17,40
2000	13,67	13,90	19,03	19,30
2200	15,93	16,07	22,70	22,73
2400	19,10	18,57	27,10	26,70
2600	23,03	22,47	31,70	32,50
2800	27,50	26,13	37,27	38,70
3000	30,23	30,00	41,40	43,70

Figura 5.33 Potencia frente a revoluciones por minuto de las diferentes mezclas de combustibles.
 Fuente: [75].

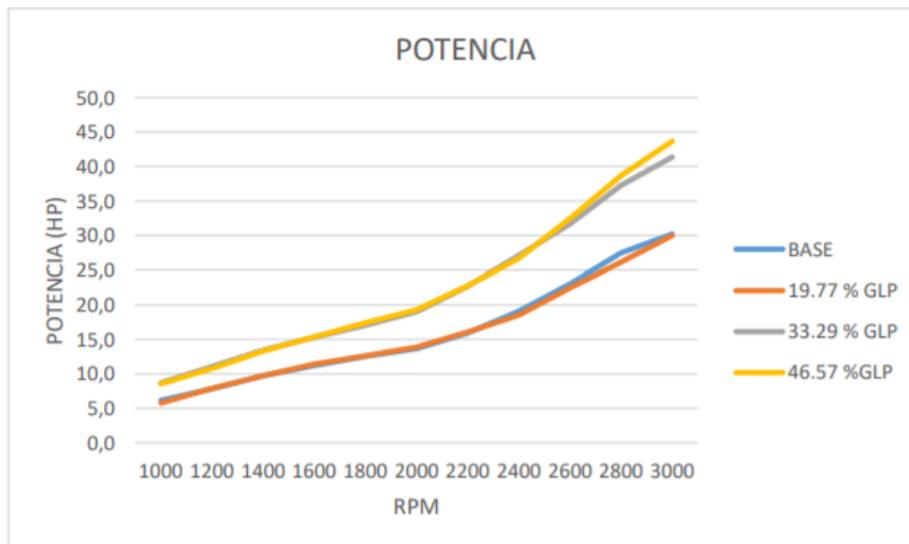


Figura 5.34 Potencia frente a revoluciones por minuto de los diferentes combustibles.
 Fuente: [75].

- Opacidad: la opacidad de un motor diésel es la oposición que ponen los gases emitidos después de la combustión al paso de un haz de luz. En pocas palabras, la opacidad de un motor de encendido por compresión mide la cantidad de gases no combustionados o productos de la combustión que emite el motor. La prueba consiste en acelerar el motor caliente en vacío, desde cero a las máximas revoluciones varias veces y medir con aparatos específicos los gases emitidos. En este estudio realizaron la prueba 3 veces e hicieron un promedio de los resultados. La conclusión de estas pruebas fueron que la opacidad de los gases emitidos por



el motor es mayor cuanto mayor es el porcentaje de GLP en la mezcla de combustibles, como se puede ver en la siguiente imagen:

	Base (%)	DIESEL+GLP 1	DIESEL+GLP 2	DIESEL+GLP 3
	100 %	80.23+19.77 %	66.71+33.29 %	53.43+46.57 %
λ	2.5	2.4	2.1	1.6

Tabla 5.35 Valores de Landa frente a las diferentes mezclas de combustibles. Fuente: [75].

- Material particulado (PM): un medidor de partículas sólidas suspendidas en los gases de escape envía los siguientes datos a la centralita del ordenador:

Tabla 3.10. Datos promedio de material particulado.

	Base	DIESEL+GLP 1	DIESEL+GLP 2	DIESEL+GLP 3
	100 %	80.23+19.77 %	66.71+33.29 %	53.43+46.57 %
N° PRUEBAS	Valor medio	Valor medio	Valor medio	Valor medio
1	98,69	157,81	185,59	168,94
2	100,09	183,70	175,91	178,20
3	98,11	180,15	180,21	197,07
Promedio	98,96	173,89	180,57	181,40

Tabla 5.36 Valores de emisiones de PM frente a las diferentes mezclas de combustibles. Fuente: [75].

Los datos dejan claro que las partículas sólidas en suspensión aumentan cuando disminuye la parte diésel del combustible, hasta alcanzar casi el doble con el 45% menos de concentración diésel en la mezcla. Este uno de los aspectos en los que el GLP está en desventaja con el GNL. Se debe a que, cómo se explicó anteriormente, los compuestos que componen el GLP tienen más átomos de carbono por molécula que el metano, componente principal del GNL. Pero no debemos obviar otros condicionantes que hagan que esto pase, la tecnología avanza a pasos agigantados y existen sistemas de filtrado de gases de escape muy eficientes que podrían minimizar este problema y hacer a esta tecnología competitiva en este aspecto. [75]

Otro estudio que versa sobre el tema en cuestión es el realizado en 1999 por integrantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima, Perú. [76] Este estudio documenta las ventajas que se obtienen en los motores diésel al alimentarlos con ciertas fracciones de GLP. También hace diferencia entre dos tipos de funcionamiento de los motores, motores de mezcla externa y motores de mezcla interna. Se diferencian en la forma de mezcla de los combustibles, si se hace previo paso de la inyección o posterior. Desde el primer momento dejan claro que el procedimiento



que más rendimiento genera en los motores es la mezcla interna. Es un artículo científico bastante antiguo en comparación con los múltiples avances que ha habido en los motores de combustión interna en las últimas dos décadas, pero esto puede reafirmar más la idea de que los gases combustibles ayudan a disminuir la contaminación y mejoran la eficiencia de los motores, ya que si se utilizaron en motores menos desarrollados y dieron resultados satisfactorios, nos hace pensar que en motores con mayor grado de desarrollo los resultados pueden llegar a ser incluso mejores.

En los experimentos que se van a citar a continuación se utilizaron varios motores diésel. El estudio empieza diciendo que en experimentos realizados en un motor de ciclo diésel Ricardo E6, de un cilindro y a una velocidad nominal de 2.500 rpm, se constató una mejora en la potencia de hasta un 10% sólo añadiendo del 16 al 22% de GLP a la mezcla de los combustibles. En otro motor diésel de 4 cilindros y a una velocidad de 2.150 rpm, se consiguió disminuir de 1,5 a 2 veces el material particulado emitido, con una sustitución del 20% de GLP en la mezcla de combustibles.

Las conclusiones de este estudio eran los prolegómenos de la tecnología de la introducción de combustible gas en motores de ciclo diésel:

- Se demostró que al menos la mezcla de 80% diésel con el restante en GLP, disminuyen hasta un 20% los gases de efecto invernadero emitidos en los gases de escape del motor, en especial los NO_x , dejando la puerta abierta a mejorar estos resultados a medida que se aumentaba la concentración de GLP en la mezcla de combustibles.
- Las mezclas internas del combustible son mucho más efectivas a la hora de comparar potencias y disminuir gases emitidos frente a los motores diésel.
- La mezcla interna de combustibles es levemente menos eficiente en la disminución de los gases expulsados durante la combustión, en comparación con los motores de mezcla externa, pero en lo referente a gases CO y C_nH_n son mucho mejores, sobre todo con cargas motoras bajas.
- Gracias a la técnica de “toxicidad sumatoria convencional de gases de escape” se demostró que el motor dual diésel-gas tiene muchas mejores ratios de contaminación que los motores convencionales de gasolina o diésel de la época. [76]

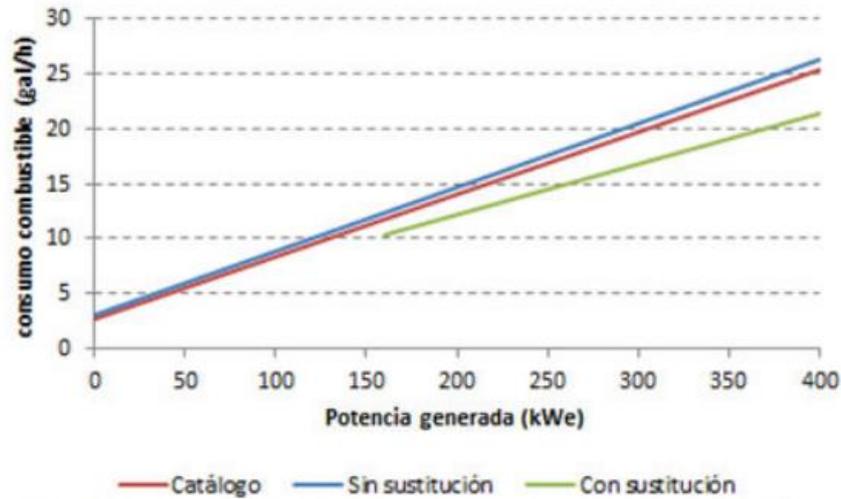
En el año 2014 se presenta un estudio de investigación en la ciudad de Lima (Perú), [77] en el que los autores proponían el estudio individualizado, mediante el software, de cuatro tipos de combustible: 100% diésel, 90-10%, 80-20% y 75-25%, para después contrastar los resultados entre ellos. Este estudio estaba centrado en la utilización de un software para el cálculo térmico de motores, pero aporta datos interesantes que apoyan el uso del GLP como combustible alternativo o dual en motores diésel. Las principales conclusiones de este estudio se encuadran a continuación:

- Cuando el motor funciona en un régimen de altas velocidades y cargas bajas, la sustitución de diésel por la fracción de GLP se puede aumentar sin perder las prestaciones iniciales del motor diésel.
- Las dos principales ventajas frente al combustible 100% diésel son: la disminución de la emisión de gases de escape, lo que determina que es una alternativa más ecológica, y su menor consumo.
- Estas ventajas sumadas a que no se necesita un gran desembolso de capital para adaptar el motor diésel para poder ser operado de manera dual, hace que esta alternativa sea viable y recomendable en la medida de lo posible. [77]

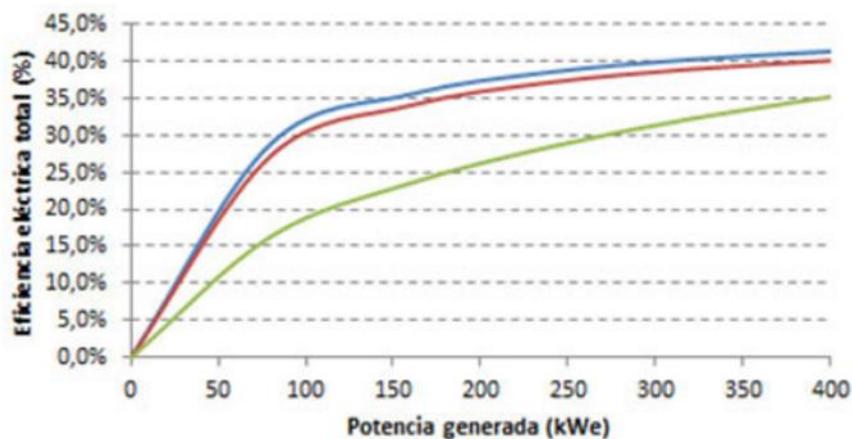
En otro proyecto [78] que se ha encontrado, se analiza “el comportamiento energético y ambiental” de la planta de generación de electricidad utilizando mezclas de diésel-GLP para alimentar un motor diésel marca Cummins de 6 cilindros y potencia de 400 kW, operando a una velocidad constante de 1.800 rpm. En el estudio explican como el GLP es almacenado en depósitos en estado líquido y después es conducido al turbocargador del motor, donde una electroválvula inyectaba la cantidad elegida, en este caso ya en estado gas, como se ha explicado en este proyecto en el apartado del uso del GNL en motores diésel. Mediante medidores de hidrocarburos (Fill-riete 820), termocupla (tipo K) y analizador de gases (Bacharach Model-300) pudieron determinar el consumo de combustible, la temperatura y composición de los gases de combustión.

Las pruebas se realizaron con cuatro niveles de carga diferentes, 25, 50, 75 y 100%, con la velocidad de 1.800 rpm del motor y con diferentes niveles de sustitución de diésel por parte de GLP. A continuación, se expondrán las principales conclusiones obtenidas durante dicho ensayo:

- Eficiencia energética: como se ha explicado más arriba, se hicieron pruebas con cargas diferentes en sentido ascendente para ver como reaccionaba el motor según la potencia de salida seleccionada. Como se puede ver en las siguientes figuras, el consumo de combustible es menor con el combustible dual, pero con una menor eficiencia. La eficiencia del motor, con ambos combustibles, aumenta cuanto más se acerca a la carga máxima requerida de 400kW y a su vez, también aumenta la eficiencia del combustible dual, con referencia a cargas menores, quedándose cerca de la eficiencia diésel a máxima carga.



Carga (%)	Potencia (kWe)	Modo diesel		Modo dual			
		E _{térm. Diesel} (kWth)	Ef. (%)	Sustitución (%)	E _{térm. Diesel} (kWth)	E _{térm. GLP} (kWth)	Ef. (%)
50	200	559,04	35,78	39,3	464,61	300,31	26,15
75	300	779,72	38,48	33,3	639,55	318,72	31,31
100	400	970,48	39,98	28,5	814,49	324,02	35,13



Gráficos 5.37 y 5.38 Representan el consumo y la eficiencia de cada combustible empleado en el motor ciclo diésel en modo bifuel. Fuente: [78].

- Emisiones de gases: el equipo de estudiantes determinó los gases emitidos a medir por el aparato analizador de gases, CO₂, CO, SO_x, NO_x y O₂. Como se ve en la tabla siguiente, se toman medidas de porcentaje en masa y de partículas de gases por millón de los compuestos citados. El motor, alimentado de dos maneras, una con diésel 100% y otra en modo Bifuel, es analizado en 3 puntos de funcionamiento, dependiendo de la potencia de salida requerida.



Tabla 4. Consumo de combustible, relación de equivalencia, A/F estequiométrica y resultados reportados del análisis de gases

Potencia <i>kWe</i>	GLP <i>kg h⁻¹</i>	diesel <i>kg h⁻¹</i>	Equivalencia <i>λ</i>	A/F stoi	CO ₂ %	CO <i>ppm</i>	SO ₂ <i>ppm</i>	O ₂ %
Modo diesel								
200	0	46,19	1,49	14,09	9,7	479	20,8	6,9
300	0	64,43	1,50	14,09	9,7	468	21,0	7
400	0	80,19	1,52	14,09	9,5	463	21,1	7,2
Modo dual								
200	23,56	38,39	1,53	14,42	10,4	2998	15,43	7,3
300	25,01	52,83	1,63	14,47	9,9	2183	14,22	8,1
400	25,42	67,30	1,74	14,55	9,4	1440	15,23	8,9

Tabla 5.39 Consumo de combustible con datos importados del análisis de gases. Fuente [78]

Analizando los resultados finales, presentes en la tabla, se puede afirmar que el sistema Bifuel genera mucho más monóxido de carbono que el sistema diésel. Esto hoy en día podría no ser un problema ya que con los sistemas de filtrado de gases de combustión se reduciría a niveles mucho más bajos, como se vio en el apartado de GNL de este proyecto. También aumenta los niveles de oxígeno que se generan durante la combustión, Esto determina que la combustión del modo Bifuel es de peor calidad que la del modo diésel. También es un problema que se podría mejorar gracias a software que controlas los tiempos de admisión de combustible, de adicción de aire y de combustión de la mezcla, haciendo el proceso mucho más eficiente.

Con respecto a las emisiones de NO_x, a potencias medias y bajas el motor en modo Bifuel contamina menos, pero a medida que la potencia se va incrementando, estas emisiones superan a los óxidos de nitrógeno emitidos por el motor en modo diésel. Esto si es un problema serio y con poco margen de mejora, una desventaja importante a la hora de tener en cuenta los parámetros de clasificación de los combustibles. [78]

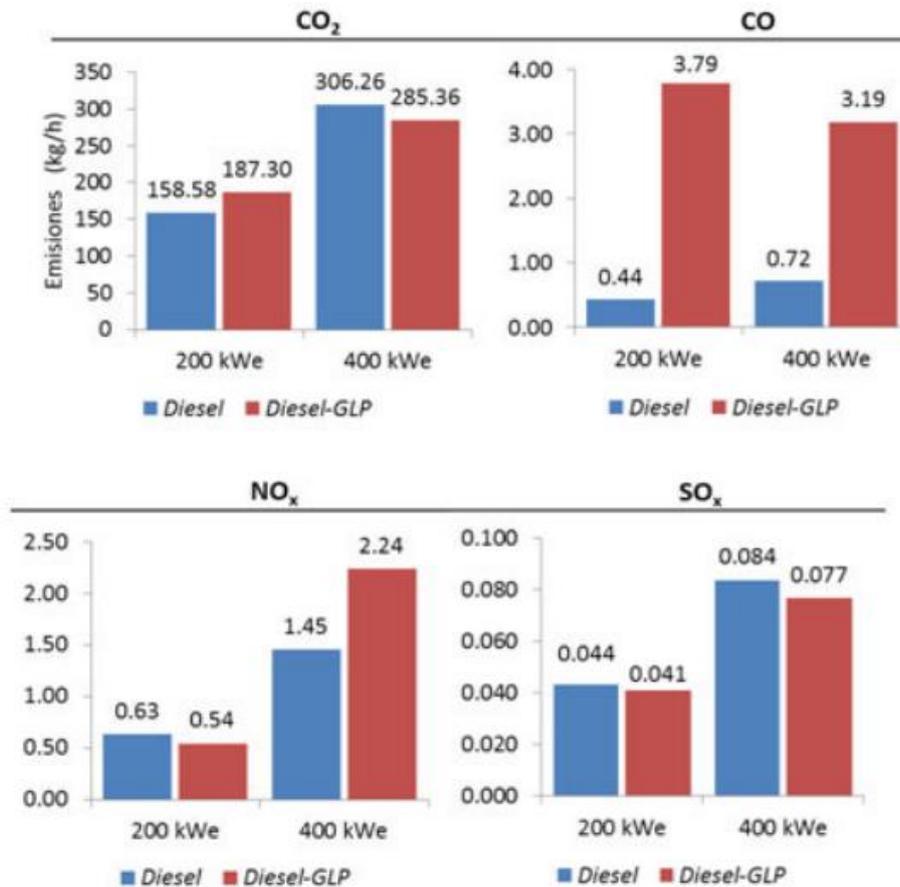


Fig. 6. Variación del flujo [kg h⁻¹] de compuestos en los gases de combustión según modo de operación y carga

Gráficas 5.39 Valores de emisiones de GEI frente a las diferentes mezclas de combustibles en un motor ciclo diésel en modo bifuel. Fuente: [78].

5.4.4 ADAPTACIONES NECESARIAS.

Los cambios a los que hay que someter a los motores de ciclo diésel para operar con GLP es prácticamente el mismo que para que funcionen con GNL, ya que, como se explicó al inicio de este capítulo, los gases licuados del petróleo tienen prácticamente las mismas cualidades que el gas natural porque están constituidos por los mismos elementos y en proporciones muy cercanas. La diferencia reside en los átomos de carbono que tiene cada combustible; el GNL está compuesto casi al 100% de metano (1 átomo de carbono y 4 de hidrógeno) y el GLP de propano y butano, ambos con más átomos de carbono. Esto lo que genera es una mayor concentración de gases tóxicos a la salida de la combustión, monóxidos y dióxidos de carbono, y puede reducir la eficiencia de esta, pero los sistemas que se deben implementar para poder usar ambos combustibles en un motor de ciclo diésel en modo bifuel, son los mismos. Por lo tanto, podemos considerar los mismos esquemas estructurales y el mismo gasto adicional que en la



adaptación de las locomotoras diésel para funcionar con GNL, descrito en capítulos anteriores, y que se materializará en el último capítulo con el ejemplo práctico.

5.4.5 SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y DE TRANSPORTE.

El almacenamiento y transporte del GLP también es muy similar al del GNL y, en este apartado, nos centraremos en explicar cómo está el sector español.

Si ponemos en nuestro buscador de internet habitual “punto de recarga de GLP” el 90% de las páginas que aparecen son relacionadas con gasolineras con tienen capacidad de expedir “Autogas”, GLP para vehículos particulares, el cual está extendiendo su uso por todo el territorio nacional y el resto del mundo.

España importa un 30% de GLP y el restante es producido en las refinerías españolas, Una vez el gas está listo para distribuirlo, se almacena en grandes contenedores llamados “nodriza” para su posterior transporte mediante camiones cisterna, buques o trenes. Llegados a las factorías de distribución de las empresas competentes, el gas puede tomar varios caminos: envasado, para distribución al pequeño consumidor, o distribución a granel. El uso de GLP envasado está destinado para consumo de viviendas o edificios públicos. En cambio, el transporte a granel es para lugares con consumos más complejos, donde los volúmenes y constancia de consumo varían según el momento. Esta distribución puede ser canalizada o por medio de métodos de transporte primarios (buques, ferrocarril o camiones). Para el almacenamiento de GLP en tanques, se puede aplicar la misma teoría que para el almacenamiento de GNL, la única diferencia que existe es que el GNL es necesario licuarlo mediante refrigerantes o aplicándole una determinada presión, al contrario que los GLP que se convierten a estado líquido en condiciones normales (temperatura ambiente y 1 atm de presión), Como ya se ha dicho, este proceso “quita” el 10% de la energía interna del volumen que se quiera licuar. [42] [61] [79]

En España existen 9 empresas operadoras que comercializan el GLP al por mayor: Atlas S.A., Combustibles y Lubricantes BP Oil España, CEPSA Comercial Petróleo S.A.U., Compañía de Gas Licuado Zaragoza S.A., DISA Gas S.A. y GALP Energía España S.A. (Fuente: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia). La idea del suministro de nuestras estaciones mediante comerciales al por mayor sería ideal para el consumo de combustible en el transporte ferroviario, y como veremos en el caso práctico no se necesitarían excesivos puntos de recarga, teniendo un puesto de suministro en cada estación importante sería válido. La mejor opción para suministrar GLP a estas plantas de recarga de los trenes sería el GLP canalizado, ya que la red gasista nacional está muy desarrollada y tiene casi unos 600.000 puntos de suministro en todo el país.

El otro aspecto para valorar en este apartado es la seguridad de almacenamiento.



Como ya se describió en el capítulo del GNL correspondiente a este tema, en España el almacenamiento de gases debe realizarse siguiendo una normativa, estas son Real Decreto 984/2015 y UNE 60250. Con respecto al tipo de gas en sí mismo, el GLP no es un gas peligroso de almacenar, siempre y cuando se sigan unos criterios de seguridad mínimos, ya que se almacena a bajas temperaturas en las cuales la ignición natural es prácticamente imposible. Cabe destacar que este tipo de gas también se almacena en estado líquido ya que ocupa mucho menos (1 litro de gas GLP equivale a 262 litros de GLP licuado). También se transporta en estado líquido en la gran mayoría de las veces, menos cuando se vierte al Sistema Gasista español, que se hace en forma gas y a altas presiones para que este pueda alcanzar su destino de forma correcta y sin pérdidas. [42] [61] [79] [80]

Por lo comentado en este apartado, podemos concluir en que el GLP es un combustible con una tecnología bastante desarrollada y con unas infraestructuras detrás que abalan su utilización y la seguridad durante su uso. Es cierto que la industria automovilística está centrada en motores de combustión de gasolina de nueva generación que aceptan el GLP como combustible principal en sus motores y esto hace que sea raro encontrar el uso de este combustible en motores diésel de gran potencia. Esta aparente desventaja puede beneficiar al desarrollo de estas otras aplicaciones con dicho combustible, ya que, si las empresas punteras en el sector invierten su dinero en adaptar las tecnologías del presente para que los motores puedan ser alimentados con GLP, no dejarán escapar la oportunidad de dar el salto a usarlo en motores diésel si puede llegar a ser más rentable que lo actual.

5.4.6 CONSUMO.

Como en el apartado dedicado al consumo de GNL en motores duales, ahora se va a calcular el consumo teórico por cada 100 km en un motor el cuál es alimentado mediante GLP y diésel en las proporciones y condiciones siguientes:

- Recorrido: 100 km.
- Locomotora Diésel-Hidráulica serie 2600 RENFE (dos cabezas tractoras).
- Motor diésel de 222 CV.
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial),
- Mezcla de combustibles 80/20.
- Velocidad máxima: 85 km/h.
- Velocidad media en el trayecto: 70 km/h.
- Peso total tren: 26.420 kg.
- Perdida de potencia por uso de gases licuados en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%.

- PCI diésel: 43100 kJ/kg.
- PCI GLP: 49520 kJ/kg.
- Densidad diésel: 0,835 gr/cm³=835 kg/m³.
- Densidad GLP: 431 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):

- (1) $P_{nominal} = P_{real} \times \eta_{t\acute{e}rmico} \times \eta_{parcial} \times \eta_{p\acute{e}rdida \text{ por mod,}}$
- (2) Consumo diésel= $P_{real} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{diésel})$
- (3) Consumo gas natural= $P_{real} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{gas \text{ natural}})$
- (4) Consumo total= $0,2 \times (3) + 0,8 \times (4)$

En la ecuación (1) se calcula la potencia real que tiene que aportar el combustible al motor diésel en la realidad, ya que, al perder fuerza debido al rendimiento térmico de los motores, por las modificaciones y por una pérdida, que se ha denominado parcial, en la que se quiere dar a entender que el automotor no está demandando el 100% de la potencia del motor todo el trayecto. Estos valores son orientativos y susceptibles de cambios dependiendo de cada situación. Se recalca que estos datos son ideales o ejemplos para poder comparar consumos entre un combustible y otro. A continuación, se realizan las operaciones anteriores con los valores numéricos:

- (1) $P_{real} = 222 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 27,984 \text{ kJ/s.}$
- (2) $CD = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 3,339 \text{ Kg diésel/100 Km.}$
- (3) $CGLP = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg GNL}}{45890 \text{ kJ}} = 3,136 \text{ Kg GLP/100 Km.}$
- (4) $CT = 3,339 \times 0,2 + 3,136 \times 0,8 = 3,1766 \text{ Kg de mezcla/100 Km.}$

5.4.7 CONTAMINACIÓN.

En esta última sección sobre el análisis del GLP en motores diésel, se hará una recopilación de los datos sobre los gases expulsados del motor durante la combustión de los componentes. Los datos, como se ha explicado en el apartado “Capacidad de hibridación”, provienen de estudios en los que este trabajo se ha basado, por lo que no



se aporta información nueva si no que se desarrollan los datos anteriormente citados y que tienen que ver con la contaminación durante el proceso de combustión.

Según el informe “EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A DIESEL, CON UN SISTEMA DE INYECCIÓN GLP COMO COMBUSTIBLE DE APORTE” (mayo 2018) se obtienen los siguientes datos sobre el material particulado emitido durante la combustión:

Tabla 3.10. Datos promedio de material particulado.

	Base	DIESEL+GLP 1	DIESEL+GLP 2	DIESEL+GLP 3
	100 %	80.23+19.77 %	66.71+33.29 %	53.43+46.57 %
N° PRUEBAS	Valor medio	Valor medio	Valor medio	Valor medio
1	98,69	157,81	185,59	168,94
2	100,09	183,70	175,91	178,20
3	98,11	180,15	180,21	197,07
Promedio	98,96	173,89	180,57	181,40

Tabla 5.40 Datos promedio de PM emitido por el motor frente a las diferentes mezclas de combustibles. Fuente [75]

En general son unos datos negativos ya que como vemos a medida que el porcentaje de GLP aumenta el material particulado aumenta también, llegando a situarse a casi el doble de cantidad con una mezcla cercana al 50-50. También debemos tener en cuenta que estos experimentos se han podido tomar con motores viejos o con unos tiempos de combustionado poco eficientes que generen esta cantidad de material. Este punto no es tan dramático, ya que, como hemos visto, existen filtros de partículas muy avanzados para motores diésel, además de que la nueva tecnología cada vez es más eficiente en este aspecto. [75]

En ese mismo estudio se registraron los datos necesarios para hacer un análisis de opacidad de los gases emitidos (en el capítulo de “Capacidad de hibridación” del GLP está explicado que entendemos por opacidad), un dato relevante para la medición de emisiones contaminantes de los motores diésel. La prueba consistió en acelerar el motor caliente en vacío, desde cero a las máximas revoluciones y medir las partículas emitidas. La prueba se realizó 3 veces para generar un promedio de los resultados, La conclusión de estas pruebas fueron que la opacidad de los gases emitidos por el motor es mayor cuanto mayor es el porcentaje de GLP en la mezcla de combustibles, lo que es otro punto en contra del uso de esta tecnología:

	Base (%)	DIESEL+GLP 1	DIESEL+GLP 2	DIESEL+GLP 3
	100 %	80.23+19.77 %	66.71+33.29 %	53.43+46.57 %
λ	2.5	2.4	2.1	1.6

Tabla 5.35 Valores de Landa frente a las diferentes mezclas de combustibles. Fuente: [75].



Para mitigar estos niveles de opacidad hay varios métodos. Como métodos preventivos podría decirse que un motor diésel utilizado en su punto óptimo de funcionamiento no debería dar estos problemas, ya que las partículas expulsadas, que tienen influencia sobre el nivel de opacidad de los gases, provienen de una mala combustión del combustible diésel. Esto quiere decir que si llevamos el motor en unas revoluciones medias/altas no tienen por qué aumentar las emisiones. También existen aditivos que se introducen en el depósito del combustible a la vez que se repone el mismo. Estos aditivos funcionan “limpiando” tanto el depósito como los conductos del combustible y escape, y la cámara de. Con esto se quiere reseñar que, si un motor es utilizado dentro del rango de funcionamiento óptimo para el cuál se fabricó y no es antiguo, no debería de dar problemas en este aspecto, y que, si por motivos que no se puedan corregir, surge este problema, se pueden utilizar técnicas que minimicen este dato. Este dato para la comparación de emisiones contaminantes que se emiten durante la combustión del combustible dual es nuevo, ya que en ninguno de los anteriores informes y estudios utilizados para recabar información sobre la contaminación de motores híbridos diésel-GNL no aparecía. [82]

En otro de los estudios analizados se recogen los datos del estudio de “el comportamiento energético y ambiental” de un motor diésel marca Cummins de 6 cilindros y potencia de 400 kW, alimentado por combustible diésel y GLP de forma dual, con diferentes porcentajes. A continuación, se muestra la tabla en la que vienen recogidos los datos obtenidos en el experimento anterior:

Potencia	GLP	diesel	Equivalencia	A/F stoi	CO ₂	CO	SO ₂	O ₂
<i>kWe</i>	<i>kg h⁻¹</i>	<i>kg h⁻¹</i>	<i>λ</i>		%	<i>ppm</i>	<i>ppm</i>	%
Modo diesel								
200	0	46,19	1,49	14,09	9,7	479	20,8	6,9
300	0	64,43	1,50	14,09	9,7	468	21,0	7
400	0	80,19	1,52	14,09	9,5	463	21,1	7,2
Modo dual								
200	23,56	38,39	1,53	14,42	10,4	2998	15,43	7,3
300	25,01	52,83	1,63	14,47	9,9	2183	14,22	8,1
400	25,42	67,30	1,74	14,55	9,4	1440	15,23	8,9

Tabla 5.36 Valores de emisiones de PM frente a las diferentes mezclas de combustibles.
 Fuente: [75].

Analizando los datos queda seguro que el sistema bifuel emite mucha más cantidad de monóxido de carbono que con el motor operando con combustible 100% diésel. Como ya se dijo más arriba, esto hoy en día podría no ser un problema ya que con los sistemas de filtrado de gases de combustión se reduciría a niveles mucho más bajos, como en el sistema bifuel con GNL. También aumentan los niveles de oxígeno que se generan durante la combustión, Esto significa que la combustión del modo Bifuel es de peor



calidad que la del modo diésel. También es un problema que se podría mejorar gracias a software que controla los tiempos de admisión de combustible, de adición de aire y de combustión de la mezcla, haciendo el proceso mucho más eficiente.

Con respecto a las emisiones de NO_x , a potencias medias y bajas el motor en modo Bifuel contamina menos, pero a medida que la potencia se va incrementando, estas emisiones superan a los óxidos de nitrógeno emitidos por el motor en modo diésel. Esto si es un problema serio y con poco margen de mejora, una desventaja importante a la hora de tener en cuenta los parámetros de clasificación de los combustibles. [78]

A continuación, se hará un recopilatorio de las principales informaciones que se han obtenido de los diversos estudios e informes en los que este capítulo está basado:

- Al aumentar la concentración de GLP en la mezcla Bifuel, el material particulado (PM) expulsado aumenta, situándose a casi el doble cuando la mezcla es 50-50%. [75]
- La opacidad de los gases emitidos en el sistema Bifuel es menor que en el motor alimentado solo por diésel, casi un punto por debajo. [78]
- Aumentan emisiones CO y HC. [78]
- En bajas y medias potencias los niveles de NO_x emitidos son más bajos que los emitidos por el motor alimentado solo con combustible diésel, pero a potencias altas esto se revierte. [81]
- La cantidad de emisiones de SO_2 en el sistema Bifuel son bastante menores en comparación con las emitidas en el uso exclusivo de combustible diésel. [81]
- Disminución gases de escape: al igual que en el apartado de GNL, los motores diésel tienen métodos para tratamiento de gases después de la combustión, como es el EGR, que sustituye oxígeno del aire por productos de la combustión, lo que disminuye su concentración a la salida del motor: óxidos de nitrógeno - 50%, partículas volátiles (PM) -10%. [78]
- Otro sistema que beneficia los motores diésel es el uso de aditivos para disminuir la opacidad de los gases emitidos durante la combustión, Aunque este problema viene motivado por dos causas: uso indebido del motor, es decir, funcionamiento del motor fuera del rango para el cual se diseñó en potencia o uso prolongado con escaso combustible, y por antigüedad del motor. [82]

5.5 HIDRÓGENO.

5.5.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMBUSTIBLE.

El hidrógeno es un elemento químico cuyo número atómico es 1, siendo el más ligero de la tabla periódica, y el más abundante en la materia visible, hasta un 75%. Se presenta como un gas inflamable, incoloro e inodoro, insoluble en agua y que pertenece al grupo de los no metales. En condiciones normales, el hidrógeno se encuentra como un gas diatómico; dos átomos de hidrógeno se juntan para obtener una mayor estabilidad. Su masa atómica es 1,00797 umas y una densidad de 0,0899 kg/m³ en estado gaseoso a temperatura ambiente, Densidad en estado líquido de 70,8 kg/m³, esto quiere decir que se necesitan 845 litros de hidrógeno gas para formar un litro de hidrógeno líquido. El hidrógeno pasa a estado líquido cuando alcanza una temperatura de -258°C aproximadamente; dato relevante para su almacenamiento ya que nos interesa tenerlo en estado líquido. Esto se consigue criogenizando los tanques de almacenamiento. Un dato relevante es que a la temperatura en la que el hidrógeno se encuentra en estado líquido, la mayoría de los gases se encuentra en estado gaseoso, lo que, si se combina, genera una atmosfera con un peligro de explosión alto. [83] [84] [85] [86] [87] [88]

El hidrógeno tiene un PCI de 120.011 kJ/kg, un valor altísimo comparado con otros combustibles. [87] En este capítulo se va a presentar el hidrógeno como un vector energético para su uso como combustible en motores de combustión interna. Éste se puede obtener mediante varios métodos relativamente sencillos que veremos a continuación. El hidrógeno es un combustible denominado limpio por su ausencia de emisiones de CO₂ durante la combustión, es mucho más fácil de controlar que otros combustibles ya que a temperatura ambiente reacciona de forma muy lenta y es bastante seguro ya que no es toxico y es el gas más liviano que existe, lo que hace que se disperse rápidamente en caso de haber una fuga, Todos estos aspectos comentados se van a desarrollar a partir de este momento, haciendo un acopio de toda la información posible y exponiendo de forma clara y sencilla como el hidrógeno puede ser un combustible alternativo para los motores internos de combustión, desde un punto objetivo, presentando las ventajas y desventajas que presenta para esta aplicación. [83] [84] [85] [86] [87] [88]

5.5.2 RESERVAS MUNDIALES Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO.

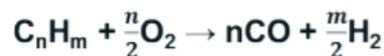
El hidrógeno es un invitado un poco diferente a los anteriores en este aspecto, ya que es una fuente energía renovable al 100%, aunque está subordinado a fuentes de energía externas para su obtención, y que no depende de la localización geográfica de los recursos naturales, como pueden ser los combustibles formados a partir de



hidrocarburos. El hidrógeno es un combustible que se produce de forma industrial mediante los siguientes procesos: químico, electrolítico, termolítico, fotolítico y biológico. Se podría decir que a nivel industrial los dos procesos más utilizados, y por tanto con una mayor tecnología desarrollada, son el proceso químico, a partir de hidrocarburos, y el electrolítico, a partir de agua.

Proceso químico: técnica industrial de producción de hidrógeno a gran escala, en el cual se utilizan hidrocarburos y alcoholes como materias primas. Estos son sometidos a diferentes procesos que acaban generando otro hidrocarburo diferente e hidrógeno (H₂). El 96% del hidrógeno producido en la industria se crea a partir de este proceso, usando el gas natural como materia prima principalmente.

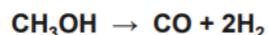
- Oxidación parcial: induce al hidrocarburo a una oxidación parcial del mismo. El aire es usado como oxidante ya que el oxígeno (O₂) presente en él, debilitando los enlaces de los átomos de carbono (C) con los átomos de hidrógeno (H₂) y sustituyendo a estos últimos:



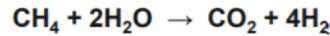
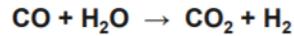
- Reformado por vapor: el hidrocarburo reacciona con el vapor de agua rompiendo los enlaces entre carbonos (C) e hidrógenos (H) y produciendo hidrógeno por separado. A esta reacción se la conoce comúnmente como “carbon-steam reaction”.



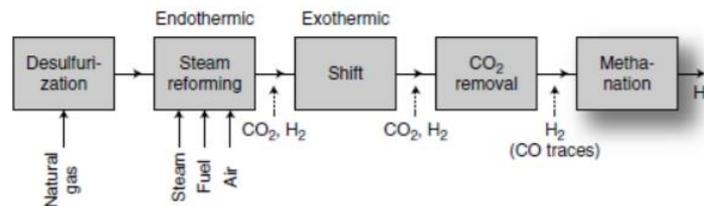
- Descomposición térmica: todo el hidrógeno producido proviene de la descomposición de los alcoholes.



- “Shift reaction”: al combinar agua y monóxido de carbono, se genera hidrógeno y dióxido de carbono, Ajustando la ratio H/C podemos producir un mayor número de moléculas de H₂. El CO₂ se retira fácilmente. Este proceso es bastante ventajoso en la producción de hidrógeno, pero tiene un gran inconveniente: es una reacción endotérmica, es decir, necesita un aporte de energía. Este aporte de energía se consigue mayormente por la combustión de un hidrocarburo.



Todos estos procesos se pueden agrupar para conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos y minimizar los costes, como a continuación se muestra en la siguiente figura, En ella se exponen las etapas que se siguen durante la generación de hidrógeno en las plantas de producción industrial. El último paso (“methanation”) explica cómo se elimina el monóxido de carbono (CO) que aún quedaba en la mezcla del hidrógeno, dejando este último en su forma óptima para el almacenamiento, sin concentración alguna de cualquier tipo de compuesto que se considere contaminante. [84] [88] [89]



5.42 Etapas del proceso de “Methanation”. Fuente: [88].

- Proceso electrolítico: sistema de generación de hidrógeno a partir del agua como materia prima, Se basa en la pila de hidrógeno, descubierta por Faraday en 1820, que descompone el agua en sus dos elementos fundamentales, Es una técnica bastante antigua que se empezó a utilizar en la industria alimentaria y farmacéutica, Una de sus principales ventajas es que el hidrógeno producido mediante esta técnica es fácilmente purificado, ya que, como se ha demostrado en el proceso anterior, si se produce hidrógeno a partir de combustibles fósiles existen posibilidades de que el producto final tenga contaminantes, Una aplicación futura de importancia de los electrolizadores se encontrará en los puntos de repostaje de vehículos de motor de celda de hidrógeno, Existen cuatro tipos de electrolitos usados para producir hidrógeno mediante electrólisis:
 - Electrolito líquido: debido a la baja conductividad del agua se han utilizado otros electrolitos líquidos para aumentar la conductividad, por eso se usan ácidos o elementos alcalinos. Estos últimos son mejores ya que previenen el problema de la corrosión. En general los electrodos líquidos se eligen en función de tres parámetros: resistencia a la corrosión, acción catalítica y superficie de contacto.



- Electrolito de polímero sólido: son más compactos que otro tipo de electrolizadores y esto les permite operar a densidades de corrientes altas. Tienen la desventaja de que necesitan agua desionizada y que producen gases húmedos, Las principales ventajas de usar este tipo de electrolitos son las siguientes: el electrolito puede ser fino, lo que reduce el tamaño de la pila, no es necesario un diafragma, no es necesario cambiar el electrolito ya que su composición es constante, no son corrosivos, la membrana puede soportar fuertes cambios de presión, pueden trabajar bajo altas corrientes y tienen una larga vida útil (20 años).
- Electrolito cerámico: es un tipo de electrolito que trabaja a unas temperaturas altísimas (entre 450 y 800 °C), utiliza vapor de agua como reactivo para producir hidrógeno seco. Se usa ya que una gran ventaja de las altas temperaturas es beneficioso para las reacciones que tienen lugar.
- Electrolizador de hidrógeno por compresión: una de las mayores ventajas de este sistema es que es simple y muy económico ya que no interviene ninguna parte móvil en el proceso. Para utilizar este tipo de electrolizadores es necesario tener un equipo presurizado, si no el coste de operación sería demasiado alto. En el suministro de hidrógeno al motor de un coche con motor de pila de hidrógeno se necesita un compresor, por lo que este método sería el mejor posicionado para usarse, en el caso que se utilice la electrólisis como método de producción y suministro de hidrógeno al motor. [84] [88] [89]

El rendimiento de los sistemas electrolíticos más actuales es de alrededor del 59%-70%, llegándose hasta rendimientos pico de 82% en diferentes técnicas nuevas como son los electrolizadores PEM. [90]

Uno de los principales problemas que se plantea a la hora de realizar un proyecto de movilidad pensando en usar el hidrógeno como combustible es su producción. Como ha demostrado, la producción del hidrógeno no es excesivamente complicada ni se compone de procesos complejos. El problema reside en que no es una tecnología lo suficientemente desarrollada como para tener plantas de producción por todo el territorio nacional ni para tener una red de distribución lo suficientemente fuerte como para asumir un consumo como el que se plantearía en este proyecto si se decidiese por el hidrógeno como combustible ideal para los motores diésel trabajando de modo dual. Como primera opción se barajó construir “pequeñas” pilas de hidrógeno, dentro de los trenes, que generaran el combustible a partir de agua y una corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica podría ser suministrada por elementos de producción de energía eléctrica renovables, como son turbinas eólicas instaladas en el propio tren o paneles solares en el techo de este, Esta opción queda descartada ya que no sería posible garantizar una producción mínima de corriente eléctrica en el 100% del recorrido del



tren. Además, a la hora del arranque surgirían tiempos más elevados de espera hasta poder empezar a suministrar combustible al tren.

La segunda opción para suministrar hidrógeno al parque móvil es la siguiente: crear una red de gasolineras de hidrógeno en las principales estaciones de la península, por las cuales vayan a pasar este tipo de trenes. Ya que los trayectos no suelen superar los 200 km entre ciudades grandes, se puede asumir que es factible esta idea. El proyecto consistiría en el estudio de las ubicaciones estratégicas para la construcción de estas gasolineras, que podrían ser las mismas que ahora tienen los puntos de recarga de diésel. Pero al ser bastante caros los equipos de producción de hidrógeno, posiblemente sea mejor disponer de un electrolizador por trayecto, es decir, entre cada dos estaciones.

Por lo comentado anteriormente, se considera que el hidrógeno no tiene rival en producción y seguridad de suministro frente a las demás alternativas, si se adopta la segunda idea de producción y suministro. Es una energía con posibilidad de producción 100% renovable, que solo necesita de una industria fuerte y desarrollada para su producción. Si bien es verdad que es un combustible con muy pocas emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, no se puede perder de vista que sus dos formas de producción tienen como fuente de energía combustibles fósiles. No tanto la electricidad en España, ya que más de la mitad es producida por métodos renovables (que no significa 100% limpios) [41], pero si la producción mediante el reformado de hidrocarburos, que, como su propio nombre indica, usa hidrocarburos como materias primas, en su mayoría metano (CH_4). En cuanto a la seguridad de suministro, ya comentado anteriormente, es un combustible el cual su producción no tiene ningún misterio y no está asociada a ninguna materia prima esencial cuyo precio dependa del contexto político mundial. A priori, el único punto débil es dónde y cómo se desarrolla esta producción y suministro. En el último capítulo, en el que se va a desarrollar un caso práctico usando todos los combustibles, se explicará que aparato y como se va a suministrar el gas a los depósitos de los trenes.

5.5.3 CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN.

La tecnología dual-fuel utilizada en los motores de ciclo Otto y ciclo Diésel incluye dentro de los combustibles alternativos al hidrógeno, A priori, puede parecer poco usual, ya que no se habla mucho de este combustible dentro de la mencionada tecnología, pero siendo uno de los gases más limpios y con mayor poder calorífico conocidos, es casi imposible que no se haya estudiado su implantación en el sistema dual-fuel para motores de combustión interna.

El segundo inconveniente que se puede esperar sobre el uso de este gas en motores de ciclo diésel, que es el caso que concierne a este proyecto, es que el hidrógeno tiene una temperatura de ignición de 585 °C, frente a los 252 °C que tiene el diésel. Esto hace



pensar que es muy complicado provocar una ignición del hidrógeno mediante compresión, y que sería una mejor idea usarlo en motores de ciclo Otto. Pues esa afirmación es mayormente errónea; el uso de hidrógeno en motores de ciclo Otto resulta poco productivo, ya que sí que es verdad que el hidrógeno reacciona bien ante el auto iniciado por llama, pero está comprobado que el gas empieza a arder incluso antes de producirse la llama. Esto es perjudicial tanto para la cámara de combustión como para la eficiencia del ciclo, ya que produce mucho gas inquemado. [86] [87]

Actualmente hay poca información al respecto, sobre todo sobre motores de combustión de alta potencia como son los que se manejan en el mundo ferroviario o naval. No obstante, este trabajo se ha apoyado en unos estudios muy interesantes del uso de combustibles alternativos en motores de ciclo diésel. En este estudio se habla del hidrógeno como principal alternativa para los motores diésel duales.

De ellos se obtienen las siguientes conclusiones del uso del gas hidrógeno como combustible: [85] [86] [87]

- En 1984, sale a la luz el estudio “Reduction of soot in diésel combustion with hydrogen and different H/C gaseous fuels.” Desarrollado por Varde KS y Varde LK, en Toronto. Es una de las primeras veces que los estudios sobre combustibles alternativos tienen en cuenta el hidrógeno. Este estudio proponía como datos de partida la sustitución de pequeñas cantidades de diésel por hidrógeno, teniendo como principales consecuencias lo siguiente: aumento del rendimiento térmico del motor y aumento de hasta un 50% de emisiones de gases contaminantes. Se observó que, al inyectar pequeñas proporciones de hidrógeno las emisiones de NO_x aumentan considerablemente, hasta un 30%.
- Las cantidades de hidrógeno utilizadas para la mezcla de diésel varían desde el 50% al 95%. Siempre se debe dejar una cierta cantidad de diésel para que la combustión se inicie debido a la compresión. Los estudios indican que el porcentaje de hidrógeno más beneficioso para este proceso se encuentra entre el 65 y 85%, Entre estos porcentajes las emisiones de material particulado, hidrocarburos inquemados y dióxidos y monóxidos de carbono desciende casi a cero, incluyendo también los temidos óxidos de nitrógeno. Esto se debe principalmente a que el hidrógeno no contiene ningún átomo de carbono en su composición molecular.
- En cualquier porcentaje de adición de hidrógeno a la muestra se asume una mejora en los rendimientos térmicos. Esto se debe a que el hidrógeno tiene un gran poder calorífico y con muchísimo menos volumen es capaz de generar la misma o mayor cantidad de energía al quemarse.
- Una de las mayores desventajas que existen en la realidad es la falta de una fuente constante y de suficiente caudal de hidrógeno al motor. Esto desemboca a que, en la realidad, se usen porcentajes menores de hidrógeno en las mezclas utilizadas, alrededor del 5%-15%. Como ya se ha explicado más arriba, una inyección pequeña de hidrógeno en la mezcla tiene como consecuencia el aumento de las emisiones



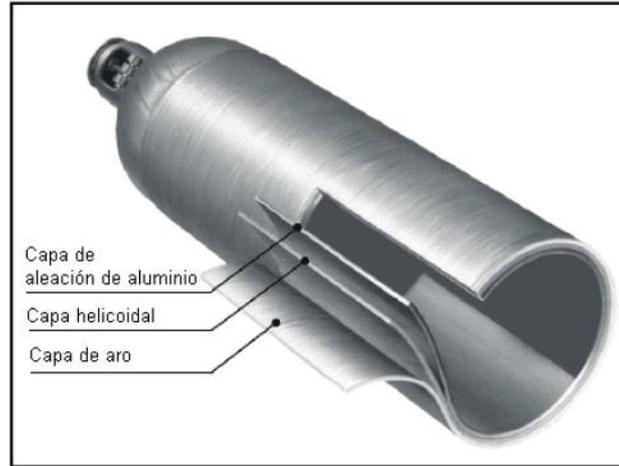
de NO_x , en este caso estudios posteriores al citado anteriormente. Una consecuencia directa de esto es que las emisiones de pueden llegar a aumentar desde un 15% hasta un 65%.

- El problema anterior se podría reducir a niveles menos problemáticos si se incluyen dentro del proceso ciertos elementos que filtren y purifiquen los gases, como se vio en capítulos anteriores de este proyecto. Estos sistemas son la recirculación de gases (EGR), el reajuste de componentes electrónicos encargados de la inyección de carburantes al motor, uso de terceras sustancias como el dietiléter o la reducción catalítica selectiva. En el apartado sobre contaminación veremos de lo que se tratan.

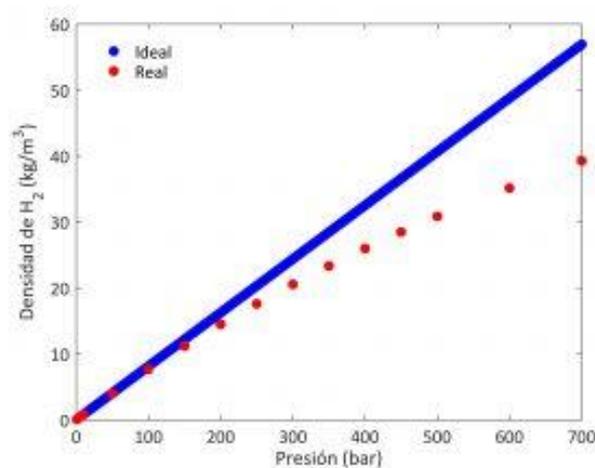
5.5.4 SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE.

Este tema es uno de los puntos clave del uso de este combustible alternativo, ya que debido a su baja densidad, pequeños volúmenes de energía equivalen a grandes volúmenes de hidrógeno en estado gas. En este caso se podría pensar que lo ideal sería almacenarlo en estado líquido y que, como se ha descrito más arriba, ocupa 800 veces menos en volumen. El principal problema de almacenarlo en estado líquido es la temperatura a la que se mantiene el hidrógeno en este estado: a -280°C . El proceso de licuefacción es costoso, ya que el hidrógeno se produce industrialmente en estado gas; este método implica el gasto del 30-40% de la energía que tiene el volumen de hidrógeno que se quiere criogenizar, un dato para tener en cuenta. [91]. Existen varias configuraciones de los depósitos destinados a mantener el hidrógeno en estado líquido, una de las más usadas son los depósitos de doble pared con nitrógeno líquido de refrigerante o con aislante metálico. [66]

Otra forma de transportar hidrógeno o de almacenarlo es hacerlo en estado gaseoso en un tanque presurizado al máximo para aumentar su densidad y que permita el abastecimiento de forma segura a diferentes valores de presión. Los sistemas más extendidos en la actualidad llegan hasta los 200 bares de presión, alcanzando los 700 bares aquellos equipos más especializados. “El consumo real para llegar a 700 bares es de aproximadamente un 15% de la energía química almacenada en el hidrógeno” Marc Fàbrega Ramos, “Hidrógeno, Aplicación en motores de combustión interna.” [87] Varios proyectos, relativamente cercanos en el tiempo, como son proyecto CUTE (2003) o el nuevo Nissa SUV (2017) han alcanzado estos niveles de presurización para el almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso. [85] Es muy común el transporte del hidrógeno en cilindros de acero de varias capas de material: existen de varios tipos, desde botellas a 200 bares hasta algunas que llegan a alcanzar los 700 bares, A continuación se muestran varias imágenes de este proyecto, la primera demostrando en un gráfico la cita anterior, la segunda de la composición de un cilindro tipo II y la tercera la relación entre la presión y la densidad del hidrógeno: [83] [89] [90] [91]



5.43 Esquema de un cilindro de almacenamiento de hidrógeno. Fuente: [85].



5.44 Variación de la densidad del hidrógeno con la presión. Fuente: [91].

En la imagen siguiente, obtenida también del proyecto “Hidrógeno, Aplicación en motores de combustión interna.” por Marc Fàbrega Ramos, se muestra el volumen que ocupa cada combustible y el peso del recipiente, para un mismo volumen energético. Esta imagen trata de justificar de forma gráfica el problema descrito en este apartado. Cuanto más se presuriza el hidrógeno menor volumen ocupa, pero mayor es su peligrosidad. Por otro lado, se puede ver que el hidrógeno líquido tiene una mejor relación volumen de combustible- peso de recipiente. [87]

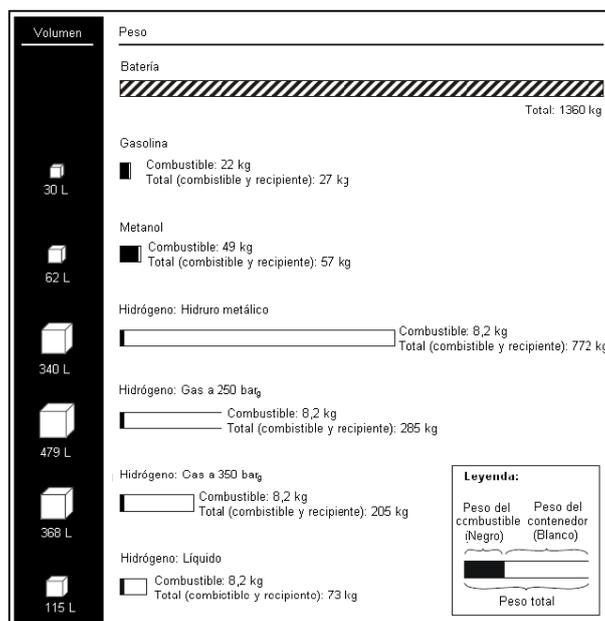


Tabla 5.45 Volumen de combustible y recipiente frente al peso que representan. Fuente: [87].

Todas las instalaciones de almacenamiento de hidrógeno deben registrarse por la norma ISO 15916 denominada “Consideraciones básicas de seguridad de los sistemas de hidrógeno” que ha sido imposible descargar de manera gratuita: en www.aenor.com tiene un valor de 88€. En términos generales esta norma indica los materiales adecuados para la construcción de los elementos, los componentes necesarios en una instalación como pueden ser válvulas, filtros, controles...etc, localización y aspectos constructivos de sistemas de detección necesarios, descripción detallada de las operaciones a realizar de manera segura y las normativas necesarias para dar de alta la instalación: control de procedimientos e infraestructuras, evaluación de riesgos...etc. [85] [93]

5.5.5 ADAPTACIONES NECESARIAS.

Una vez elegida la tipología del sistema de suministro de hidrógeno al tren, se debe definir los nuevos aparatos y dispositivos que se necesitan para llevar a cabo ese abastecimiento del nuevo combustible al motor de ciclo diésel existente, manteniendo las condiciones de seguridad que dictan las normas establecidas. Las principales adaptaciones que necesita el sistema de inyección diésel son las siguientes:

- Depósito de locomotora: como ya se ha comentado, existen dos formas de transportar hidrógeno: en estado líquido o en estado gas. Cada una de las dos opciones tiene sus ventajas y sus desventajas. En el último capítulo en el que se harán

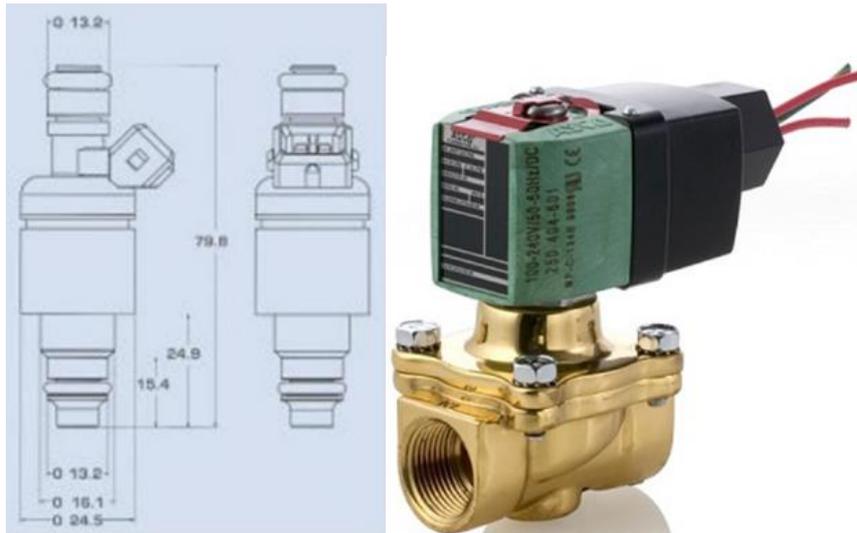
referencia a los precios comerciales encontrados, se explicarán detalladamente estos costes.

- Electrolizador y depósito en tierra: el electrolizador elegido para la producción de hidrógeno tiene que estar diseñado estrictamente para suministrar de forma semanal el volumen requerido por la locomotora, lo cual, se verá en su capítulo correspondiente. Los electrolizadores industriales producen hidrógeno en estado gas a temperaturas que rondan los 70°C y a presiones entorno los 120 y 200 bares, Ya se han comentado las características de los depósitos de hidrógeno, por lo tanto, el dispositivo de almacenamiento en tierra deberá de corresponder a esa información.
- Controladores de presión: los controladores de presión son muy importantes ya que miden la presión de las diferentes partes del sistema en todo momento. Sirven tanto como para avisar de averías como para permitir el trabajo del vaporizador. Son aparatos caros comparados con su tamaño, pero necesarios para un correcto funcionamiento de la instalación.



- Vaporizador: el uso de este elemento ya se explicó en el capítulo del GNL, en el apartado que versa sobre los cambios necesarios que se deben llevar a cabo en la instalación para el uso de este combustible. También se utiliza en el caso del GLP como combustible alternativo. En pocas palabras, este dispositivo lo que hace es generar una diferencia de presión entre el depósito y el inyector para que el combustible aumente su temperatura y cambie de estado líquido a estado de gas, que es el modo en el que se introduce en la cámara de combustión. Es posible que este dispositivo tengas que ser cambiado por un regulador de presión previo al inyector, si el depósito del tren transporta hidrógeno en estado gas.
- Inyector: en el trabajo de Cristian Familiar Xaudaró [85] se llega a la conclusión que la manera más segura y eficiente de colocar un inyector de hidrógeno en estado gas,

es hacerlo a unos cuantos milímetros de la válvula de admisión del combustible. Este inyector estará compuesto por una válvula solenoide, que mediante un sistema electromagnético es capaz de inyectar el gas cuando es necesario. A continuación, se adjuntan dos fotos, un plano del inyector elegido para la aplicación desarrollada en el trabajo citado, a modo de familiarización con el elemento, y una imagen del sistema de corte del inyector:



5.46 Esquema de inyector y válvula de inyección (derecha). Fuente: [85].

- **Filtros:** uno de los principales inconvenientes de los electrolizadores es que puedan aparecer trazas de impurezas en los productos. Para esto se colocan filtros tanto a la salida del electrolizador como a la salida también de los dos tanques de almacenamiento que se han propuesto, uno en tierra y otro incorporado al tren. El peligro de las impurezas que se puedan generar es que se pueden acumular en zonas críticas del circuito de tuberías y lleguen a colapsar el paso del combustible. Existe una página web “Norman Filters” donde se comercializan filtros para hidrógeno, contando con una ratio grande de flujos y presiones admisibles. Están contruidos en acero inoxidable y su funcionamiento es bastante sencillo. A continuación, se muestra una imagen de uno de los filtros del comercial para dejar una idea clara de lo que se necesita:



5.48 Imágenes de filtros de hidrógeno. Fuente: [85].

- **“Flame arresters”**: Estos dispositivos se incorporan dentro de depósitos en los que existe algún tipo de peligrosidad debida a la facilidad de inflamación por parte del combustible. También se les puede instalar en el final del trayecto, antes del vaporizador, para evitar cualquier tipo de peligro a la hora de pasar de líquido a gas. También es muy interesante ubicarlos justo antes del inyector, por si acaso la llama producida dentro del motor retrocede por el conducto y, aunque existen válvulas de corte rápido ante cualquier situación anómala, puede ser de mucha ayuda a la hora de la seguridad de una instalación de uso de hidrógeno como combustible en trenes, como la que se está estudiando en este apartado. Se adjuntan dos fotos de los dispositivos descritos, para familiarizar al lector con ellos:



5.49 Imágenes de flame arresters. Fuente: [85].

- **Sistema de distribución**: el hidrógeno es llevado desde el depósito hasta el inyector por tuberías de acero inoxidable. Esto se debe al carácter resistente de este material tanto a los cambios de presión como a los diferentes peligros que puede presentar el flujo constante de un compuesto químico como es el hidrógeno líquido o gaseoso.



Las tuberías pueden estar refrigeradas con un material aislante para conseguir un menor calentamiento mientras el hidrógeno viaja de un punto a otro de la instalación, ya que si éste se calienta empieza a vaporizarse y a ocupar mucho volumen, situación muy desfavorable y peligrosa para la instalación.

5.5.6 CONSUMO.

Este apartado es similar al desarrollado en los gases combustibles alternativos para los motores duales. Se va a calcular el consumo teórico por cada 100 km en un motor el cuál es alimentado mediante hidrógeno y diésel en las proporciones y condiciones siguientes:

- Recorrido: 100 km.
- Locomotora Diésel-Hidráulica serie 2600 RENFE (dos cabezas tractoras).
- Motor diésel de 222 CV.
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial).
- Mezcla de combustibles 80/20.
- Velocidad máxima: 85 km/h.
- Velocidad media en el trayecto: 70 km/h.
- Peso total tren: 26.420 kg.
- Perdida de potencia por uso de gases licuados en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%.
- PCI diésel: 43100 kJ/kg.
- PCI Hidrógeno: 120011 kJ/kg.
- Densidad diésel: 0,835 gr/cm³=835 kg/m³.
- Densidad H_{2 gas}: 0,071 kg/m³.
- Densidad H_{2 liq}: 70,8 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):

$$(1) P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}} \times \eta_{\text{pérdida por mod.}}$$

$$(2) \text{Consumo diésel} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$$

$$(3) \text{Consumo hidrógeno} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{Hidrógeno}})$$

$$(4) \text{Consumo total} = 0,2 \times (3) + 0,8 \times (2)$$

En la ecuación (1) se calcula la potencia real que tiene que aportar el combustible al motor diésel en la realidad, ya que, al perder fuerza debido al rendimiento térmico de los motores, por las modificaciones y por una pérdida, que se ha denominado parcial, en la que se quiere dar a entender que el automotor no está demandando el 100% de la



potencia del motor todo el trayecto. Estos valores son orientativos y dependientes de cada situación. Se recalca que estos datos son ideales o ejemplos para poder comparar consumos entre un combustible y otro. A continuación, se realizan las operaciones anteriores con los valores numéricos:

$$(1) P_{\text{real}} = 222 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 27,984 \text{ kJ/s.}$$

$$(2) CD = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 3,339 \text{ Kg diésel/100 Km.}$$

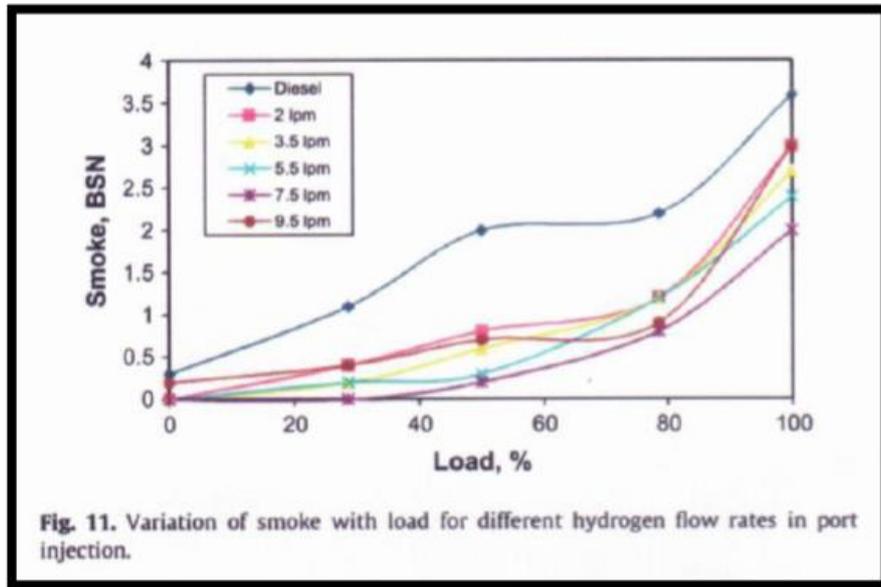
$$(3) H_2 = \frac{27,984 \text{ kJ/s}}{70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 100 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg Hidrógeno}}{120,000 \text{ kJ}} = 1,200 \text{ Kg/100 Km.}$$

$$(4) CT = 3,339 \times 0,2 + 1,200 \times 0,8 = 1,627 \text{ Kg de mezcla/100 Km.}$$

5.6.7 CONTAMINACIÓN.

Recopilación de conclusiones sobre la contaminación en sistemas con motores de ciclo diésel actuando en modo bifuel, con hidrógeno de combustible principal:

- Como premisa, la combustión ideal del hidrógeno solo generaría agua. Es decir, que teóricamente las emisiones contaminantes de CO y CO₂ deben ser nulas, Por otra parte, las emisiones de NO_x son las más preocupantes a la hora de introducir hidrógeno en un motor de combustión interna de compresión, “aun así, se han registrado descensos en estas emisiones operando el motor con hidrógeno y diésel (siendo hidrógeno el combustible principal), respecto del uso de diésel solamente,” Cristian Xaudaró Familiar, 2010. [85]
- Las emisiones de material particulado (llamado PM en análisis anteriores) se produce debido a la falta de perfección en la combustión, generando hidrocarburos inquemados que son expulsados del motor por el sistema de escape. En los motores con sistema dual, diésel-hidrógeno, las cantidades expulsadas de estos materiales disminuyen considerablemente, aumentando la disminución a medida que el peso del hidrógeno en la mezcla es mayor. A continuación, se adjunta una gráfica que representa niveles de partículas emitidas “Smoke”, frente a diferentes porcentajes de cargas de distintos combustibles (en azul diésel y los demás diferentes cargas en hidrógeno). [85] [95]



5.49 Gráfica que muestra la variación de las emisiones GEI frente a la carga del motor.
Fuente: [95].

- El monóxido de carbono también es un gas peligroso para el medio ambiente y es producido en los motores de combustión interna, Las mezclas de combustibles tradicionales junto con combustibles alternativos han dado lugar a una disminución de estas emisiones junto con las de dióxido de carbono, Esto se debe a que el hidrógeno no tiene átomos de carbono, Obviamente si dejamos una fracción menor de combustible diésel en la mezcla, estas emisiones serán ínfimas, pero no nulas. Así lo abalan los estudios que realizaron Freymann y Eichseder en 2003. [96]
- Como ya hemos visto, existen dos compuestos, óxidos de nitrógeno, que son muy perjudiciales para el medio ambiente. El monóxido de nitrógeno se produce por la reacción del nitrógeno y el combustible, a la hora de la combustión, y el dióxido de nitrógeno está presente en el aire de manera natural. Existe un punto crítico en el uso del hidrógeno como combustible en la emisión de estos compuestos contaminantes. Está demostrado científicamente [97], que para altas concentraciones de hidrógeno en la mezcla (a partir del 65%) el sistema disminuye los óxidos de nitrógeno generados a cantidades que van del 0% al 15%, Pero estos estudios también revelan algo importante: a su vez, si la importancia del hidrógeno en la mezcla es menor (entorno al 15%-20%) el motor genera un aumento de monóxidos de carbono en niveles alarmantes. [97]
Este problema puede tener una solución parcial: sistemas de tratamiento de los gases de escape, Ya vimos en el capítulo de la contaminación genera por sistemas duales GNL-diésel cómo funcionaba el sistema EGR, recirculando los gases de



combustión otra vez dentro de la cámara de combustión, reduciendo hasta un 25% en los motores duales siendo el hidrógeno el principal combustible. [97]
 Otra solución a este problema es la utilización de software que controle la CPU del motor, aumentando la eficiencia de la combustión al máximo, realizando una ingeniería sobre el tiempo de los procesos anteriores a la combustión,
 Al proponer una sustitución del 80% de la mezcla por hidrógeno, este proyecto no debería de fijarse en ese problema, aunque bien es cierto que es necesario apuntar.

5.6 COMPARATIVA ENTRE LOS COMBUSTIBLES.

A continuación, se va a exponer una tabla en la cual en las columnas vendrán representados los combustibles alternativos propuestos en este proyecto y en las filas las características comunes que se han desarrollado en cada combustible. Habrá 3 posibles puntuaciones: rojo (no satisfactorio), naranja (insuficientemente satisfactorio/sin cambios respecto a combustibles tradicionales) y verde (satisfactorio). Esta puntuación dependerá de todos los aspectos tratados anteriormente, dentro de cada capítulo de los tres combustibles alternativos que se han propuesto en este trabajo.

El fin de esto es generar una especie de media ponderada de cada combustible con respecto a los avances que se hacen en comparación a las características del combustible tradicional usado en la actualidad en los motores de ciclo diésel de los trenes nacionales, el gasóleo. Se podría pensar que el gasóleo debería tener todas sus casillas en naranja, pero no es así, ya que es otro combustible competidor con los alternativos que se han propuesto. Por ejemplo, en el tema del coste de adaptación de los equipos, el combustible diésel es el mejor posicionado, ya que las actuales infraestructuras están pensadas totalmente para el uso de este combustible.

	GASÓLEO	GNL	GLP	HIDRÓGENO
PRODUCCIÓN Y SEGURIDAD DE SUMINISTRO				
CAPACIDAD DE HIBRIDACIÓN				
ADAPTACIONES NECESARIAS				

EMISIONES CONTAMINANTES				
SEGURIDAD DE ALMACENAMIENTO Y TRASPORTE				
CONSUMO				

5.51 Tabla de elaboración propia.

En conclusión, decidir qué combustible es la mejor alternativa al gasóleo, actualmente utilizado por el parque móvil ferroviario en nuestro país, es una tarea muy complicada y en la cual habría que incluir otros condicionantes que surgen a la hora de hacer efectivo este proyecto.

A la vista de lo estudiado hasta hora, teóricamente, hoy por hoy, el combustible que mejor se adapta a las exigencias de un motor de ciclo diésel, es el Gas Natural Licuado, Es cierto que es un combustible fósil y que su producción depende mucho de las políticas de los países en los que se encuentran las principales reservas, pero, como ya se explicó en su momento, las reservas probadas de gas natural nos darán para años de hibridación en los cuales se pueden ir desarrollando otras energías alternativas.

Representa un ahorro de casi la mitad del coste del gasóleo, como también se explicó más atrás. Su consumo es muy parecido al del gasóleo, pero se llega a ahorrar un porcentaje, que a la larga puede ser significativo, del combustible quemado en un trayecto ejemplo, como veremos más adelante, punto en el que coincide con el GLP, pero es sobrepasado por el hidrógeno. En cuanto a la contaminación, el GNL mejora en gran medida los niveles de gases tóxicos emitidos al quemar gasóleo. Los GLP se acercan pero no llegan a ser competencia en este apartado. El hidrógeno sí que se considera por encima de cualquier otro en temas de contaminación, ya que prácticamente no emite gases tóxicos, y los emitidos, son consecuencia de la quema de la pequeña porción de gasóleo que es necesario añadir a la muestra para que se genere una correcta combustión de la mezcla, El aspecto que más costes adicionales puede generar es la adaptación de los equipos y del sistema de almacenamiento y suministro de combustible al motor, En este punto, el GNL y los GLP tienen un coste parecido, no muy alto pero si significativo y a tener en cuenta, En la otra cara de la moneda está el hidrógeno, que necesita cambios importantes en las instalaciones ya que está regido por otras normas y, como se explicó en su momento, es un combustible que no tiene un gran desarrollo detrás como para adaptarlo a diferentes procesos, como el que se propone en este

proyecto. No hay más que ver el siguiente mapa de España, donde se representan los puntos de recarga de los 3 combustibles citados para automoción. [98] [99] [100]



5.52 Imágenes de puntos de recarga de hidrógeno (izquierda), GNL (centro) y GLP (derecha). Fuente: [99] [98] [100].

Mientras que la ausencia de puntos de recarga de hidrógeno se debe a que la tecnología todavía no tiene un desarrollo eficiente para movilidad a nivel de automoción, la diferencia entre las plantas de GLP y GNL es casi mínima, siendo dos de los combustibles alternativos al diésel y, sobre todo, a la gasolina más abundantes para el sector de la automoción en nuestro país.

Finalmente, sumando todo lo descrito anteriormente, a tener una red gasista bien desarrollada en todo el territorio nacional se elige el Gas Natural en estado líquido como el combustible alternativo más apto para su hibridación con el gasóleo con el fin de utilizar esta mezcla en un motor de ciclo Diésel. A continuación, se estudiará la implantación de cada uno de estos combustibles sobre un tren que, realizada un trayecto determinado, con el fin de demostrar con cálculos empíricos las conclusiones que se han obtenido teóricamente en todo lo visto hasta el momento.

6. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA DEL CAMBIO.

6.1 TRAYECTO EJEMPLO.

En esta última parte del proyecto se va a tratar de dar respaldo a todo lo que se ha desarrollado con anterioridad con cifras que acerquen la teoría a la realidad. Se va a elegir un trayecto concreto y real, en el que cada día confían muchas personas para trasladarse tanto a sus lugares de trabajo como por ocio, y se van a realizar los cálculos pertinentes para demostrar de forma objetiva el combustible más limpio y económico que debería utilizarse en esta vía y en todas las vías no electrificadas. Con este proyecto también se intenta dar eco a un problema de actualidad porque, como se justificará más adelante, en España existen muchas vías destinadas a cubrir zonas de poca densidad de población que se encuentran en estado de abandono por parte de las instituciones. Ayudando de esta manera a que se revitalice de algún modo el ferrocarril como uno de los medios de transporte diario más fiable, reduciendo el uso de transporte privado y por ende el consumo de combustible fósil en nuestro país.

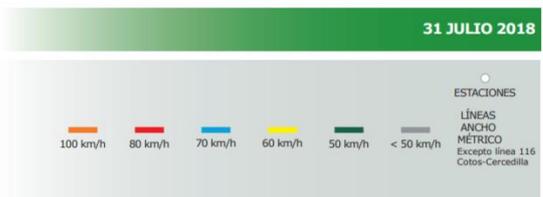
- Características del trayecto: el trayecto Santander-Oviedo es el elegido para realizar este estudio técnico y económico. Se trata de aproximadamente 216 km de vías que conectan dos ciudades de tamaño mediano, Oviedo con 220.000 habitantes y Santander con 172.000. [101] A parte de estas dos ciudades, este trayecto también atraviesa comarcas importantes dentro de Cantabria y Asturias, como son Torrelavega, Cabezón de la Sal, Unquera, Ribadesella o San Vicente de la Barquera, por lo que se puede decir que es una vía troncal para las dos comunidades autónomas, Es una vía de ancho métrico gestionada por Adif, por la que circulan actualmente dos trenes diarios, dos por la mañana y dos por la tarde, El trayecto está constituido por 93,5 km de doble vía electrificada (Oviedo-Infesto y Santander-Cabezón de la Sal) y por una vía no electrificada de poco más de 123 km, realizado en unos 80 minutos, A continuación, se muestran varios mapas que ilustran mejor la vía descrita. [6] [9] [10] [11] [103]



MAPA 5.1
TIPOLOGÍA DE LA ELECTRIFICACIÓN
DE LAS LÍNEAS DE ANCHO MÉTRICO



MAPA 2.2
VELOCIDADES MÁXIMAS DE LAS
LÍNEAS DE ANCHO MÉTRICO



6.1 Mapas de las vías ferroviarias de ancho métrico. Fuente: [10].



Según el ICANE (Instituto Cántabro de Estadística) circularon 2924 trenes en 2012, últimos datos disponibles. [102] Esto es imposible, ya RENFE solo dispone a la venta de dos billetes diarios de ida y vuelta, en el trayecto Santander-Oviedo. Esto quiere decir que las estadísticas obtenidas cuentan también los trenes de cercanías entre Santander y Cabezón, por ejemplo. Extrapolando estos datos a los 600-650 trenes que hay al año, exclusivamente de la ruta Santander-Oviedo, se obtienen unos 32.000 viajeros por año, en esta ruta. Puede parecer una cifra pequeña, pero comparándola con la cifra de 14.000 turismos matriculados nuevos en Cantabria, durante el pasado año 2018, o el tamaño de las ciudades y pueblos que atraviesa, da que pensar. A continuación, se muestra la tabla con los viajeros y trenes de la ruta mencionada en 2012: [102] [103]

Tramos					
-- -- Oviedo - Santander					
Variables					
Meses	Trenes	Trenes - Km	Plazas - Km	Viajeros	Viajeros - Km
+2012	2.924	463.588	34.700.084	146.639	8.895.935

6.2 Captura de datos del ICANE. Fuente: [102].

6.2 LOCOMOTORA.

El tren que realiza este trayecto está compuesto por dos cabezas tractoras de la serie 2700 UTDH, que quiere decir que es una locomotora de tipo diésel-hidráulica, Hay que recordar que al principio de este proyecto se describen los tipos de cabezas tractoras que existen.

Este tipo de locomotora contiene un motor diésel MTU 0M 460 HLA-6H1800.R84, con una potencia nominal de 390 CV, de bajos niveles sonoros. Pesa alrededor de los 67.000 Kg y cuenta con 90 plazas para pasajeros. Estas unidades están construidas alrededor de 2006, con un coste de 3,26 M€ cada unidad. Alcanza una velocidad máxima de 120 km/h y su fabricante es Sunsundegui-CAF. [27] [28] [104] A continuación, una foto de una Serie 2700, obtenida en la página web de RENFE:



6.3 Imagen de locomotora serie 2700. Fuente: [Renfe].

Como se ha dicho más arriba, esta vía lleva bastante tiempo en proceso de abandono por parte de las instituciones asturianas y cántabras, donde las últimas citadas están más preocupadas por conseguir fondos del Estado para que el AVE llegue a Reinosa o una conexión de alta velocidad entre Santander y Bilbao, que por el desplazamiento de más de 30000 personas cada año, más las que lo harán en otros medios de transporte más fiables al no gozar el tren de cercanías con esta fiabilidad que si te da un autocar o un turismo.

Las noticias sobre fallos mecánicos o retenciones debidas a la dejadez de limpieza y mantenimiento de la vía y del tren, son constantes, aquí se muestran varios ejemplos de este año 2019.

“Igualmente, la línea Oviedo-Santander quedó interrumpida a las 9,12 horas a causa de la caída de dos grandes árboles sobre la catenaria cerca de Infiesto.” El Comercio, 16 de noviembre 2019. [105]

“Sin combustible diésel disponible, el tren que este mediodía debía cubrir el trayecto Oviedo-Santander tuvo que detenerse en Llanes. Los pasajeros, según explicó Renfe, fueron trasladados en autocar hasta Cabezón de la Sal, desde donde reanudaron su viaje, en otro tren de Cercanías, hasta la capital cántabra. Sin embargo, esta versión difiere a la de uno de esos usuarios afectados, quien relató a través de las redes sociales un periplo mucho más incómodo.” Dani Busto para El Comercio, 19 de noviembre 2019. [106]



“El tren que completa el recorrido entre Santander y Oviedo se ha detenido alrededor de las diez menos cuarto de la mañana al llegar a la estación de FEVE de Torrelavega debido a un problema que ha impedido que las ramas se recojan. Después de quince minutos, Renfe ha informado a los usuarios que su viaje proseguiría en cercanías hasta Cabezón de la Sal. Posteriormente, allí, un autobús les acercará hasta Llanes y finalmente desde la localidad asturiana llegarán a Oviedo en tren, Una auténtica odisea para completar el trayecto que ha propiciado que los usuarios muestren su malestar en redes sociales.” El diario Cantabria.es, 4 de abril 2019. [107]

“...la mayoría de las formaciones han coincidido en hacer de las conexiones ferroviarias uno de sus principales estandartes de cara al 10N. Concretamente, el AVE con Madrid y un tren que conecte Santander con Bilbao de forma directa y rápida. Sin embargo, y salvo contadas excepciones, los servicios de Cercanías en Cantabria han pasado desapercibidos. Sí que es cierto que se han reivindicado de forma explícita y no como parte de otras medidas, pero en este final de campaña la realidad ha vuelto a colocar la renovación de este servicio como una urgencia para miles de cántabros.” “En este último día de campaña Cantabria por lo Público y Sin Recortes ha reclamado paliar la “grave” situación que viven los Cercanías en la comunidad, un servicio que “no está muriendo”, sino que “lo están dejando morir por inanición.” A su juicio, el AVE es “el mayor cáncer en materia ferroviaria” en Cantabria, pues su reivindicación resta recursos que podrían destinarse a un servicio mucho más necesario para las cerca de 700.000 personas que cogen uno de estos trenes en Cantabria.” El Diario Cantabria.es, 8 de noviembre 2019. [108]

6.3 SISTEMA ACTUAL: GASÓLEO.

6.3.1 CONSUMO.

Ahora se va a realizar un cálculo de costes asociados al consumo y mantenimiento de vías que se tienen con el modelo actual, es decir, utilizando como combustible el gasóleo, Tratará de ser lo más realista posible para al final poder obtener unas conclusiones factibles sobre el modelo actual,

Se seguirá la pauta elaborada para el pequeño estudio de consumos realizado por cada combustible en el apartado teórico; datos del tren y de los combustibles:

- Recorrido: 216 km.
- Motor diésel de 390 CV.
- Rendimiento térmico del motor del 35%,
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial).
- Velocidad máxima: 120 km/h.



- Velocidad media en el trayecto: 95 km/h.
- Peso total tren: 67.000 kg.
- PCI diésel: 43.100 kJ/kg.
- Densidad diésel: 835 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):

$$(1) P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}}$$

$$(2) \text{Consumo diésel} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$$

$$(1) 390 \text{ CV} * \frac{0,736 \text{ Kw}}{1 \text{ CV}} = P_{\text{real}} \times 0,35 \times 0,7; P_{\text{real}} = 70,33 \text{ kW},$$

$$(2) \text{CD} = \frac{70,33 \text{ kJ/sg}}{\frac{95 \text{ km}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ sg}} * 43100 \text{ kJ/kg}} = 13,36 \text{ Kg gasoil},$$

Bien, cómo se ha demostrado, actualmente se consumen 13,36 kg de gasoil cada trayecto. Si lo pasamos a volumen para calcular su coste, obtenemos que se consumen 16 litros de gasóleo, redondeando. Con el precio actual del gasóleo obtenemos que se gastan unos 14€ por viaje, teniendo en cuenta el precio de Gasóleo tipo B, a día 23/11/19, 0,869€/l.

6.3.2 COSTES DE MANTENIMIENTO.

En el trabajo de Alfredo Ruiz Jaldón titulado “Análisis de viabilidad económica de la línea de alta velocidad La Coruña-Bilbao” presentado en junio de 2016, se citan datos obtenidos de varios artículos, Soler en 2015 y Europapress 2013, donde se estiman que los costes del mantenimiento y operación de una vía convencional de ferrocarril en España rondan entre los 100.000 y 130.000 euros por kilómetro. Haciendo un cálculo rápido con este coste y los kilómetros de vía del trayecto elegido, se obtiene que el coste debido al mantenimiento de las infraestructuras es de 24 millones de euros. Este coste es común para todas las alternativas, ya que, una vez considerado el desembolso inicial, ningún combustible de los propuestos presenta un gasto adicional de las infraestructuras, tanto de las vías como de los componentes mecánicos de las locomotoras. Cabe destacar que el combustible gasóleo puede tener efectos perjudiciales, a la larga, en los motores, como ya se explicó en su momento, por la formación de carbonilla y otras sustancias producto de la combustión de compuestos en los que aparece el carbono. [23] [109]



6.3.3 INGRESOS POR BILLETES.

Todo no son pérdidas, a todos estos gastos hay que sumar el beneficio obtenido por los billetes expedidos. Es cierto que la cifra que se obtiene es menor que las que se manejan, por ejemplo, para el mantenimiento, pero no hay que perder de vista que la empresa encargada de la logística y el mantenimiento de las vías ferroviarias en España es de carácter público, es decir, la pagan todos los españoles con sus impuestos, lo cual hace que, si otras vías tienen beneficios, estos vayan destinados a las menos rentables. Para el día 25 de noviembre de 2019, el coste de los billetes de los siguientes días ronda entre los 35 y 39 euros el viaje (según una página web de búsqueda de billetes www.thetrainline.com), si se realiza la sencilla operación de multiplicar un precio medio precio unitario (37€) del billete por los viajeros que tiene esta línea a lo largo del año se obtiene la cantidad de 1,184M€. La cifra de viajeros debería multiplicarse en 20 veces para que este trayecto fuese rentable.

6.3.4 BALANCE DE LA TECNOLOGÍA ACTUAL.

Ante el avance de las nuevas tecnologías y de las normativas en lo referente a las emisiones contaminantes a la atmósfera, el combustible diésel “tiene sus días contados”. No desaparecerá de golpe, por lo que este proyecto, como se describió en sus primeras páginas, trata de dar alternativas viables a este combustible. Alternativas que, adaptadas a la realidad con este trayecto elegido, tienen que ser menos contaminantes, que mejoren o mantengan las prestaciones actuales y sobre todo: que sean económicas. El gasóleo a día de hoy es un combustible bastante rentable y comparado con su máximo competidor, la gasolina, está presente en bastantes más aplicaciones, ya que presenta consumos más bajos que su perseguidor y se puede utilizar para motores de elevada potencia. El problema principal del diésel son sus emisiones de agentes contaminantes, como se demostró anteriormente. Por estas razones, no realizar ningún cambio sobre la locomotora actual es la última opción a la hora de concluir este proyecto.

6.4 GAS NATURAL LICUADO.

6.4.1 COSTE DE ADAPTACIÓN.

Los cambios necesarios para adaptar del motor de ciclo diésel propuesto para el uso del sistema bifuel con gas natural licuado, ya han sido explicados. En este apartado se va a intentar poner cifras a tales cambios. Adaptar un motor convencional que emplea gasolina para el uso de gas natural como único o parcial combustible, sería relativamente sencillo, ya que, como se explicó más atrás, en un motor de ciclo otto el



combustible es inyectado antes de la compresión, y el gas natural tiene unas características idóneas para combustionar bajo las condiciones que rigen el funcionamiento de este tipo de motor. En cambio, en un motor de ciclo diésel, el sistema debe ser más complejo, ya que el gasoil debe introducirse a la vez que se introduce el aire en la cámara de combustión, justo antes de la compresión que genera la combustión. El inyector de gas se coloca de tal forma que se pueda introducir este otro combustible a la misma vez que el gasóleo y el aire de la mezcla. El precio de adaptar un turismo para el uso bifuel se encuentra en una horquilla de 1.500 a 2.500 euros. También se hace referencia a las adaptaciones realizadas en motores más potentes, como camiones de largo recorrido, los cuales usan GLP como los trenes de este proyecto, y su coste se incrementa en un 15%, la horquilla pasa a abarcar de 1.800 a 2.900 euros. Podemos suponer que, si esto cuesta adaptar un motor diésel de camión, el coste de adaptar un motor que es más grande cueste entorno a los 3.000-3.500 euros. [110] [111] [112]

A este precio hay que sumar el coste de los depósitos, uno en tierra y otro dentro de la locomotora, como se propuso en el apartado teórico. Preguntando en varias empresas españolas, como son LAPESA y CALVERA, se ha llegado a un consenso de lo que cuesta el kg de combustible gas (GNL y GLP) almacenado. El precio acordado es de 1,5 a 2,5 €/kg, El GNL hay que criogenizarlo previamente antes de introducirlo al tanque de almacenamiento, operación que aumenta un 15% el coste del depósito, llegando a la cifra del en torno a 1,8 y 2,8 €/kg. [66] [113]

Como se demostrará a continuación, en el trayecto se consumen 15,89 litros, si cada día se realizan dos repostajes por estación, se requerirán 31,78 litros de GNL, que semanalmente se convertirán en 225 litros, en cada estación. Hay que tener en cuenta que el depósito de tierra debe garantizar el abastecimiento de esos 225 litros semanales pero el depósito alojado en el tren debe albergar un volumen de ambos combustibles tal que le permita al tren recorrer unos 600 km sin reabastecerse, por si hubiese cualquier tipo de avería o problema, Esto se tendrá como norma general con todos los combustibles analizados. Si con 15,89 litros se realizan 216 km, para recorrer 600 km se necesitarán 44,14 litros de GNL. El depósito en tierra deberá tener una capacidad equivalente a 105 kg de gas, que se traduce a 240-370€, El tanque de almacenamiento del gas licuado en el tren tendrá que guardar 22 kg aproximadamente, lo que determina un coste de alrededor de 40-62€. La operación de llenado de los depósitos del tren al 100% sólo se deberá realizar en el primer repostaje, a partir de ahí solo habría que reponer la fracción gastada del combustible en el trayecto, o cada los trayectos que se estimen oportunos, por eso el siguiente cálculo de consumo se realizará con lo consumido por trayecto.

6.4.2 CONSUMO.

Como se ha desarrollado en el apartado de consumo diésel de la locomotora de la Serie 2700 de RENFE, se va a seguir el estilo del cálculo del combustible consumido en el apartado teórico, pero adaptándolo a nuestro caso real:

- Recorrido: 216 km.
- Motor diésel de 390 CV.
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial).
- Pérdida de potencia por uso de gas en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%.
- Mezcla de combustibles 80/20.
- Velocidad máxima: 120 km/h.
- Velocidad media en el trayecto: 95 km/h.
- Peso total tren: 67000 kg.
- PCI diésel: 43100 kJ/kg.
- PCI GNL: 47.000 kJ/kg.
- Densidad diésel: 0,835 gr/cm³=835 kg/m³.
- Densidad GNL: 431 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):

$$(1) P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}} \times \eta_{\text{pérdida por mod.}}$$

$$(2) \text{Consumo diésel} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$$

$$(3) \text{Consumo gas natural} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{gas natural}})$$

$$(4) \text{Consumo total} = 0,2 \times (2) + 0,8 \times (3)$$

Aplicando los datos de partida a las ecuaciones se obtiene:

$$(1) P_{\text{real}} = 390 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 49,16 \text{ kJ/s}$$

$$(2) \text{CD} = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 9,33 \text{ Kg diesel.}$$

$$(3) \text{CGNL} = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg GNL}}{47.00 \text{ kJ}} = 8,561 \text{ Kg GNL.}$$

$$(4) \text{CT} = 9,33 \times 0,2 + 8,561 \times 0,8 = 8,715 \text{ Kg de mezcla}$$



Si se convierten estos kilos a unidades de volumen (litros) y se multiplican por el coste del combustible, se obtiene el precio que supone cubrir este trayecto mediante el sistema bifuel. En este caso se tienen 9,33 kg de gasóleo que en volumen es 11,17 litros, siendo el 20% de la muestra, se queda en 2,23 litros, que en euros equivale a 1,95€. De GNL se consume el 80% de 8,561 kg, lo que equivale a 6,845 kg. Una vez más se convierte la medida de peso en volumen mediante la densidad del combustible líquido, se obtiene que este peso equivale a 15,89 litros de gas natural licuado, El precio medio del GNL en España a día de 28/11/2019 es de 0,844 €/litro, según www.combustibles.observatoriodeprecios.com, por lo que el gasto en GNL en este trayecto sería de 13,41€.

En conclusión, para adaptar la locomotora para el uso de gasóleo y GNL habría que desembolsar alrededor de 3,000-3,500€ en adaptación del sistema, 280-432€ en depósitos y 15,36€ por viaje en consumos de carburante.

6.5 GASES LICUADOS DEL PETRÓLEO.

6.5.1 COSTE DE ADAPTACIÓN.

Los gases licuados del petróleo se comportan de una forma muy parecida al gas natural, ya que son primos hermanos. Ya se conoce que el GLP está formado por propano y butano en diferentes proporciones, lo que le confiere unas características intermedias entre ambos compuestos. Las dos operaciones claves para este proyecto que se han desvelado de forma teórica anteriormente son: el almacenamiento y el suministro al motor. El GLP es el combustible alternativo que más se comercializa en nuestro país, por delante del gas natural. Aun así, el coste de adaptar un vehículo cuyo motor es de ciclo otto o diésel cuesta prácticamente lo mismo que preparar el mismo vehículo para que utilice GNL. La diferencia está en que está mucho más extendido, tanto a nivel comercial enfocado al consumo (transporte, uso doméstico, uso bloque de viviendas...etc,) como a nivel tecnológico, a la hora de fabricar nuevos vehículos menos contaminantes. Por lo tanto, se puede afirmar que los costes de almacenamiento y adaptación del sistema diésel al uso de GLP como combustible principal en adicción de gasóleo, son de 3300€ en el caso más favorable. [66] [110] [111] [112] [113]

6.5.2 CONSUMO.

A continuación, se va a explicar cómo se conocen los gastos debidos al consumo del motor propuesto trabajando bajo el sistema bifuel:



- Recorrido: 216 km.
- Motor diésel de 390 CV
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial),
- Pérdida de potencia por uso de gas en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%,
- Mezcla de combustibles 80/20.
- Velocidad máxima: 120 km/h
- Velocidad media en el trayecto: 95 km/h.
- Peso total tren: 67000 kg.
- PCI diésel: 43.100 kJ/kg.
- PCI GLP: 49.520 kJ/kg.
- Densidad diésel: 0,835 gr/cm³=835 kg/m³
- Densidad GLP: 431 kg/m³.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto real, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado:

$$(1) P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}} \times \eta_{\text{pérdida por mod.}}$$

$$(2) \text{Consumo diésel} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$$

$$(3) \text{Consumo gas natural} = P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{gas natural}})$$

$$(4) \text{Consumo total} = 0,2 \times (2) + 0,8 \times (3)$$

Aplicando los datos de partida a las ecuaciones se obtiene:

$$(1) P_{\text{real}} = 390 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 49,16 \text{ kJ/s}$$

$$(2) CD = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 9,33 \text{ Kg diesel,}$$

$$(3) CGNL = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg GLP}}{49,530 \text{ kJ}} = 8,124 \text{ Kg GLP,}$$

$$(4) CT = 9,33 \times 0,2 + 8,124 \times 0,8 = 8,365 \text{ Kg de mezcla}$$

El coste del consumo de la fracción del combustible gasóleo de la muestra se mantiene del caso anterior: el 20% de 9,33 kg que en volumen nos quedan 2,23 litros y en coste real 1,95€ por trayecto. El volumen de GLP líquido equivalente al 80% de los 8,124 kg consumidos es de 15 litros, que multiplicado por su precio a día 2 de diciembre de 2019 (0,722€/litro) es de 10,88€.



Como se ha explicado anteriormente, es necesario tener siempre disponible más volumen de combustible, por posibles averías o imprevisto. Como norma general, se quiere dejar una autonomía para cubrir al menos 600 km, por lo que, si con 15 litros se cubren 216 km, para cubrir 600 km son necesarios 41,66 litros de combustible GLP, si se hace el mismo cálculo con el gasóleo, obtenemos que es necesario un volumen de 6,2 litros. Para calcular la capacidad necesaria del depósito en tierra se calcula el consumo semanal de GLP: dos trayectos al día, por siete días a la semana por el consumo por trayecto, nos da un volumen de 210 litros (91 kg/semana).

Como se explicó anteriormente se usarán dos depósitos cuya capacidad máxima estará determinada por el volumen necesario para cubrir 600 km sin repostar. Anteriormente se aportó el dato de que el coste por unidad de masa de los tanques de almacenamiento es de 1,5-2,5 €/kg, en este caso, el GLP se licua a temperatura ambiente, por lo que el precio no asciende de ahí. Por lo tanto, los datos anteriores marcan que el coste de almacenar GLP en tierra variará entre 137€ y 228€, mientras que el de almacenamiento de GLP en el tren (18kg=41,66 litros) es entre 27-45€.

En conclusión, para esta tecnología hay que desembolsar alrededor de 3.300€, entre 164-273€ en depósitos y 13€ de consumo de combustible por trayecto.

6.6 HIDRÓGENO

El uso de hidrógeno como combustible en motores de ciclo diésel de gran potencia, como los utilizados en el transporte ferroviario, no está muy extendido. Es cierto que últimamente se están realizando bastantes avances en esta tecnología y que no es un problema su utilización, ya que tiene unas propiedades muy buenas para su uso combustible, pero el problema de utilizar este gas como combustible son todos los procesos previos a su uso: producción, transporte y almacenamiento, como se explicó anteriormente. Por lo tanto, es una tecnología bastante difícil de encontrar información sobre ella, este proyecto va a dar unos precios orientativos sobre el coste que suponen los equipos e instalaciones necesarias para desarrollarla. Son precios obtenidos de páginas web comerciales o de trabajos científicos disponibles en los repositorios académicos.

El hidrógeno no es como el gas natural, el gasóleo o el GLP, que tienen una red de distribución fuerte y de los cuales puedes encontrar puntos de repostaje a lo largo de

todo el territorio nacional en abundancia, Como ya se explicó más atrás, la idea de este proyecto era tener una “hidrolinera” en cada estación importante, es decir, en este caso necesitaríamos dos unidades, una en Santander y otra en Oviedo, Cada “hidrolinera”

debe contar con un electrolizador, un depósito en tierra y un depósito en el tren, El hidrógeno puede ser almacenado en estado líquido o en estado gas, ambos con sus pros y sus contras, En este apartado se va a dar el precio de coste de ambas tecnologías, teniendo en cuenta que no la más económica es la más eficiente en términos globales,

Si se opta por hidrógeno gas almacenado en bombonas comerciales presurizadas el precio va a depender del tipo del recipiente, es decir, de su nivel de presurización. Los costes de los cilindros son: 250€/kg (hasta 200 bares tipo I), 1000 €/kg (350 bares tipo III) y 1700€/kg (700 bares tipo III). [114] Estos son precios del año 2006, pasando por la página del INE [101] y calculando lo que han variado los precios desde ese año, obtenemos que el coste ha variado con una tasa del 20%, por lo que el coste más económico pasa a ser 300€/kg y el más caro 2040€/kg. En este mismo trabajo se aportan precios de lo que costaría almacenar hidrógeno en estado líquido, sin tener en cuenta los costes previos debidos a la licuefacción necesaria, que conviene recordar que es de alrededor del 40% de la energía que contiene ese volumen de combustible. El precio dado en esta investigación es de 150 €/kg, alcanzando densidades de energía de entre 4,8 MJ/litro y 8,4 MJ/litro. Este coste actualizado con respecto al IPC se convierte en 180€/kg.

6.6.1 Consumo y coste

A continuación, se va a explicar cómo se conocen los gastos debidos al consumo del motor propuesto trabajando bajo el sistema bifuel:

- Recorrido: 216 km.
- Motor diésel de 390 CV.
- Rendimiento térmico del motor del 35%.
- Potencia promedio de un 70% de la nominal (rendimiento parcial),
- Perdida de potencia por uso de gas en lugar diésel y modificaciones: aproximadamente un 30%.
- Mezcla de combustibles 80/20
- Velocidad máxima: 120 km/h.
- Velocidad media en el trayecto: 95 km/h.
- Peso total tren: 67.000 kg.
- PCI diésel: 43.100 kJ/kg.
- PCI Hidrógeno: 120.011 kJ/kg.
- Densidad diésel: $0,835 \text{ gr/cm}^3 = 835 \text{ kg/m}^3$.
- Densidad H_2 gas: $0,071 \text{ kg/m}^3$.
- Densidad H_2 liq: $70,8 \text{ kg/m}^3$.

Para calcular el consumo que se genera en este trayecto ideal, tendremos que utilizar conversiones de potencia hasta llegar al resultado ideal (kg/100km):



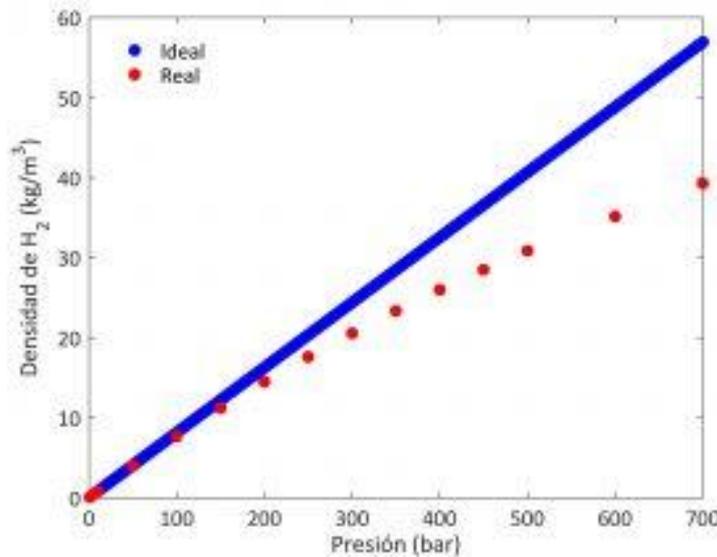
- (5) $P_{\text{nominal}} = P_{\text{real}} \times \eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{parcial}} \times \eta_{\text{pérdida por mod.}}$
- (6) Consumo diésel = $P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{diésel}})$
- (7) Consumo gas natural = $P_{\text{real}} / (\text{Vel, Media} \times \text{PCI}_{\text{gas natural}})$
- (8) Consumo total = $0,2 \times (2) + 0,8 \times (3)$

Aplicando los datos de partida a las ecuaciones se obtiene:

- (5) $P_{\text{real}} = 390 \text{ cv} \times \frac{0,735 \text{ Kw}}{1 \text{ cv}} \times 0,35 \times 0,7 \times 0,7 = 49,16 \text{ kJ/s}$
- (6) $CD = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg diésel}}{43100 \text{ kJ}} = 9,33 \text{ Kg diesel,}$
- (7) $CH_2 = \frac{49,16 \text{ kJ/s}}{95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}} \times 216 \text{ km} \times \frac{1 \text{ kg Hidrógeno}}{120011 \text{ kJ}} = 3,35 \text{ Kg H}_2,$
- (8) $CT = 9,33 \times 0,2 + 3,35 \times 0,8 = 4,546 \text{ Kg de mezcla}$

El coste del consumo de la fracción del combustible gasóleo de la muestra se mantiene de los casos anteriores: el 20% de 9,33 kg que en volumen nos quedan 2,23 litros, que pasados a dinero son 1,95€, como en los casos anteriores. Como se ha propuesto en los combustibles anteriores, se pretende tener suministro asegurado para cubrir 600 km sin repostar, lo que hace que el consumo de gasóleo sea de 6,20 litros, lo que equivale a 5,39 € por trayecto. En el caso del hidrógeno, si con el 80% de 3,35 kg, que son 2,68 kg, se recorren 216 km, para recorrer una distancia de 600 km sin repostar se requieren 7,44 kg, que equivalen a 105,000 litros de gas y a 105 litros de líquido, todos estos datos dados a presión atmosférica. Como se ha descrito más atrás, estos consumos calculados para 600 km sirven para el cálculo del volumen de los depósitos en tren, pero no influyen en el coste de cada trayecto, ya que este se calculará con los datos obtenidos para 216 km.

La densidad de los gases varía con la presión; a cuanto más presión, mayor densidad, A continuación, la siguiente gráfica muestra el comportamiento de la densidad del hidrógeno con respecto a la presión a la que es sometido, representando la demostración que hace en el artículo: [115]



6.4 Variación de la densidad del hidrógeno con la presión. Fuente: [91].

En azul representa cómo se comportaría el hidrógeno según las leyes de gases ideales, y en rojo cómo en realidad se comporta debido al factor de compresibilidad. Las densidades que más nos interesan son a 120, 200, 350 y 700 bares que son: 10, 14, 23 y 40 kg/m³ aproximadamente. Con estos valores se puede saber cuánto ocupa el hidrógeno gas en las diferentes etapas del sistema propuesto y, por ende, el coste asociado a cada una de ellas.

6.6.2 Costes de adaptación

Se tiene una demanda de 2,68 kg por trayecto. Si se tiene en cuenta que en tierra es necesario el suministro de una semana, esta cifra es multiplicada por dos (viajes al día) y por siete (días de la semana), lo que determina que se necesitan 37,5 kg en tierra para suministro semanal.

Con los precios obtenidos anteriormente de los cilindros para almacenar hidrógeno en estado gas y de los depósitos, para hacerlo en estado líquido, se pueden dar cifras de lo que costaría este almacenamiento:

- Depósito en tierra estado gas: caso más favorable (cilindro a 200 bares) 11.250€ y caso más desfavorable (cilindro a 700 bares) 76.500 €,
- Depósito en tierra estado líquido: 6.750€.
- Depósito en tren estado gas: caso más favorable (cilindro a 200 bares) 2.230€ y caso más desfavorable (cilindro a 700 bares) 15.200€.
- Depósito en tren estado líquido: 1.340€.

Como se ha explicado en el capítulo en el que se describe la producción de hidrógeno, la opción comercial más económica para el suministro de este combustible es la del electrolizador. Los electrolizadores industriales generan hidrógeno en estado gas a una temperatura de 70 °C y una presión que varía entre 120 y 200 bares. [116] Por lo tanto, si se tiene un consumo semanal de 37,5 kg de hidrógeno, que a presión atmosférica equivalen a 528 m³ de gas, se utilizan los datos obtenidos de la gráfica anterior para obtener el volumen necesario a producir de hidrógeno en estado gas por la celda electrolítica que se necesita para aplicar esta tecnología. Haciendo números se obtiene que el flujo semanal necesario de producir es 3,75-2,7 m³ de hidrógeno a la presión indicada.

El coste energético de producción de un m³ de hidrógeno por un electrolizador equivale a 4,9-5,6 kWh de electricidad. [89] Si el consumo por viaje es de 37,7 m³ de hidrógeno en estado gas (2,7 kg), esto determina que el coste, teniendo en cuenta el precio actual del kWh industrial que es de 0,083€/kWh, varía del 15,35€/viaje y 17,5€/viaje. [89] [117]

Existen varios comercializadores de electrolizadores como son: Teledyne ESGE, De Nora S.A.P. o Norsk Hydro. La cuestión es elegir un equipo que nos pueda suministrar esos 3,75-2,7 m³ semanales. El electrolizador necesario para este proyecto tendría una potencia de 200 kW y una producción anual alrededor de 2.000 kg de H₂, Según estas premisas el coste del electrolizador compra e instalación, ascendería a unos 1.000 \$/kW que equivalente en euros es 903 €/kW, lo que, multiplicado por la potencia del aparato, da un coste de 180.000 € por máquina, aproximadamente. [85] [118]

En resumen, los gastos de esta tecnología son los siguientes:

- Consumos de combustible: 15,35-17,5 €/viaje de hidrógeno y 1,95€/viaje de gasóleo.
- Coste electrolizador: 180.000 € (dos electrolizadores).
- Coste sistemas de almacenamiento: en cilindros gas de 14.000 € a 92.000€ y en depósitos criogenizados 8.500 €.

7. CONCLUSIONES.

Para terminar este trabajo, se van a resumir las principales conclusiones que se han obtenido durante la fase de estudio teórico y económico de cada uno de los puntos clave sobre el análisis de las posibles alternativas al uso del gasóleo como combustible principal en las locomotoras diésel que recorren las vías no electrificadas en el territorio español. Comparando las hipótesis teóricas con los resultados empíricos realizados en la última parte del proyecto, aplicando los cambios previstos a un trayecto y una locomotora reales:

- En primer lugar, la electrificación es una propuesta inviable para este tipo de vías convencionales. Primero por su alto coste, según ADIF, el coste de la electrificación de este tipo de vías en corriente continua a 3 kV ronda el medio millón de euros por kilómetro, dependiendo mucho de la topografía del terreno en cuestión. Esto supondría un gasto de 108.000.000 € para electrificar todo el trayecto que este proyecto ha estudiado, por poner un ejemplo sobre los casi 6.000 km que existen de este tipo de vías en la red de ferrocarriles españoles. Esta cifra se puede comparar con la obtenida anteriormente que representaba lo que cuesta el mantenimiento anualmente: es el presupuesto de 5 años de mantenimiento de estas vías. A juicio de este proyecto, el segundo problema importante que surge a la hora de querer electrificar todos estos kilómetros de vías recorridos por locomotoras diésel es el referido a la topografía del trayecto. En el caso del trayecto que se ha analizado en este proyecto, es prácticamente inviable, ya que los costes de adaptación de las infraestructuras para la electrificación disparan el precio por km de dicha actuación, debida a túneles, puentes, desniveles y, en definitiva, a la topografía de la zona norte del territorio español. Por lo tanto, la electrificación se desestimó en cuanto se conocieron estos dos condicionantes.
- En segundo lugar, la tecnología actual no es la adecuada en términos de contaminación. Puede que esté en los márgenes permitidos por la ley, pero muy cercano a estos. El problema reside en que las leyes estatales y europeas van a ser cada vez más estrictas, acotando cada vez más el rango de emisiones contaminantes que los motores de combustión interna puedan generar. Con lo cual, y como se explicó anteriormente, el motor de ciclo diésel utilizando gasóleo sería la última opción para este proyecto y en todo caso si todas las posibles alternativas fueran inviables.
- El gas natural licuado (GNL) se postula como la alternativa más conveniente por los siguientes motivos. Tiene un bajo coste de adaptación de los equipos para el uso de la tecnología bifuel 80-20 (80% de combustible gas y 20% de combustible gasóleo), ya que, como se ha demostrado en su capítulo correspondiente, este montante se encuentra en torno a 3.000-3.500€ por locomotora, cifra bastante asequible. El gas natural cuenta, además, con una red de distribución fuerte que llega a casi la



totalidad del territorio nacional. Este aspecto pone al GNL a nivel similar al gasóleo, gasolina o GLP en temas de seguridad de suministro. Sí que es cierto que en este tema tiene una ventaja, y es que no es un producto derivado del petróleo como puede ser el gasóleo o los GLP, por lo que gana puntos respecto a su más cercano competidor. El consumo que requiere esta tecnología bifuel es levemente mayor al combustible gasoil, ya que, aunque en masa, la cantidad de gasóleo necesario para cubrir las mismas distancias es menor, debido a la diferencia de densidad con el gas natural, hace que se requiera más volumen de combustible en el caso del GNL. El precio por kilómetro de esta tecnología es de 0,0738 €, frente a 0,0648 € del gasóleo. Con respecto a los costes debidos al almacenamiento, el GNL está igualado al GLP, ya que cuesta prácticamente lo mismo almacenar ambos gases en estado líquido. El coste de almacenamiento del GNL es de entre 1,8€/kg y 2,8€/kg, un 15% más que el coste para el GLP ya que el GNL es necesario criogenizarlo para cambiar su estado a líquido, En cuanto a una de las características estudiadas más definitorias a la hora de elegir un combustible u otro, como es la emisión de GEI (gases de efecto invernadero), el GNL se postula como la mejor opción. Se justificó en este proyecto que el GNL, al estar compuesto por el 98% de CH₄, al quemarse expulsa muchos menos compuestos en los que está presente el Carbono, como pueden ser los CO₂. Además de esto, el uso de la tecnología bifuel (80/20) permite a los motores disminuir drásticamente las emisiones de NO_x, uno de los gases más contaminantes que generan los motores de combustión interna. También es cierto que en algunos experimentos se aprecian aumentos significativos de HC y CO, pero que pueden ser minimizados tanto técnicamente como mecánicamente. El GNL no produce carbonilla, pero la fracción de gasóleo de la mezcla si, dato para tener en cuenta pero que será igual para todos. Todo esto sin perder ninguna potencia, comparado con el sistema tradicional de los motores de ciclo diésel.

- Los gases licuados del petróleo (GNL) se presentan como los máximos competidores del gas natural licuado. Tienen unas características muy similares y los precios de adaptación, del coste de los depósitos para su almacenamiento o el gasto que produce el consumo, son muy cercanos. El coste de adaptación del sistema diésel al modelo bifuel para el uso del GLP junto al gasóleo es de entre 3.000€ y 3.500€, igual que la adaptación para GNL+gasóleo. El suministro de este combustible en nuestro país tiene una red de distribución igual de fuerte que la del gas natural, incluso está más extendido que éste último para su uso como combustible vehicular. La nota negativa en este aspecto es que es un producto derivado del petróleo, lo cual hace que sea dependiente de éste, al contrario que el gas natural, y tal y como está el asunto de la extracción y producción de petróleo en el mundo en estos momentos puede ser que sea un combustible menos atractivo para el mercado futuro. El almacenamiento del GLP es más barato que el del GNL, aproximadamente un 15%, ya que este gas se licua a temperatura ambiente y no es necesario refrigerarlo como el GNL. El precio de almacenamiento varía entre 1,5€/kg y 2,5€/kg. El consumo de este combustible es mayor en masa que en el sistema bifuel utilizando GNL, pero al



tener el GLP mayor densidad y ambos un precio parecido, el coste por trayecto en esta tecnología disminuye a 13€, situándose por debajo del gasoil y del GNL. Y por último uno de los aspectos más importantes, si no el que más, las emisiones contaminantes de esta tecnología. El GLP utilizado en un sistema bifuel, junto con gasóleo, se encuentra entre el GNL y el sistema clásico del uso del gasóleo en emisiones contaminantes. En primer lugar, reduce un 50% aproximadamente del material particulado expulsado por el motor. Los monóxidos de carbono (CO) y los hidrocarburos inquemados (HC) se expulsan en la misma cantidad que en la tecnología bifuel con GNL como principal combustible. Los óxidos de sulfuro (SO_x) disminuyen con respecto al diésel y, si se utiliza el sistema EGR se pueden disminuir los óxidos de nitrógeno (NO_x) hasta la mitad de los niveles que se alcanzaban con el sistema tradicional.

- Por último, está el hidrógeno. Este combustible, o vector energético como se le denomina comúnmente en la actualidad, pierde notablemente en el aspecto económico, ya que se ha visto todo el gasto que conlleva. Aproximadamente, el coste de compra e instalación de los equipos necesarios para su producción y almacenamiento son los siguientes: 900 € por kilovatio de potencia instalada en el electrolizador, los cuales, en la industria, suelen ser de 200 kW o 1.000 kW, Se necesitan entre 4,9 y 5,6 kWh para producir un metro cúbico de H₂. Se pueden utilizar dos más pequeños para tener uno en cada estación, pero el coste sería el mismo ya que la demanda no cambia. El coste del almacenamiento de hidrógeno varía en función de si se acumula en estado gas o en estado líquido: en estado gas los depósitos varían entre 300€/kg y 2.040€/kg (cuanta más presión menos volumen, pero más caros) y en estado líquido 180€/kg. Hay que tener en cuenta que para criogenizar el hidrógeno y así poderlo almacenar en estado líquido, hay que consumir el 40% de la energía interna del volumen convertido. A este precio hay que sumar el coste de la adaptación del motor y las obras necesarias que se supondrá será el mismo coste que para los sistemas anteriores. El hidrógeno es el combustible estudiado con mejor seguridad de suministro tiene, ya que su producción es interna y sólo depende de la entidad operadora, porque se genera mediante consumo de agua y electricidad. El hidrógeno es el combustible más limpio de los estudiados en este proyecto, ya que no contiene ningún átomo de carbono, En un sistema dual (80-20) las emisiones de CO y CO₂ son ínfimas y sólo debidas a la combustión del gasóleo. Las partículas expulsadas (PM) siguen los mismos pasos, aunque por razones de imperfecciones en la combustión se genera un cierto volumen para tener en cuenta, siempre mucho menores que el diésel. Está demostrado que óxidos de nitrógeno (NO_x) disminuyen hasta valores que rondan del 15% al 0% de las emisiones de estos mismos gases en el sistema tradicional. El hidrógeno requiere de un consumo constante de agua y electricidad, dos fuentes de energía que son de las más contaminantes en su producción industrial, asique lo que se gana por un lado se pierde por otro.



Como resumen de la conclusión se puede afirmar que, de los tres combustibles analizados, teniendo en cuenta las alternativas de electrificar las vías convencionales o dejar el sistema con la actual tecnología, en gas natural licuado (GNL) es la mejor opción para utilizarlo en un motor de ciclo diésel adaptado al sistema bifuel. Este combustible es elegido porque mantiene el rendimiento del motor disminuyendo considerablemente la contaminación sin tener que realizarse un gran desembolso de capital para poder materializarlo. Además, como ya se ha explicado en varias ocasiones, es un producto que no depende del petróleo y además existen reservas probadas de gas natural para muchos años, lo cual es un aspecto más por el cual este es el combustible idóneo para el futuro inmediato, usando los ahorros que puede producir para el desarrollo de otras técnicas, como pueden ser el hidrógeno, las cuales necesitan un nivel de tecnología más avanzada que llegará antes si se invierte en ello.

8. BIBLIOGRAFIA.

- [1]- Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), Euroestat.
- [2]- Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España.
- [3]- Según AEMA.
- [4]- "La indispensabilidad del ferrocarril en el desarrollo económico español: estado de la cuestión." Por Jerónimo Ruiz Posadas. Disponible en:
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7272/RuizPosadasJeronomo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5]- "El ferrocarril de vía estrecha en España, 1852-2010, el papel de la intermodalidad y de la demanda de su construcción y estado actual." Por Mateu Morillas-Torné, 2017.
- [6]- "El ferrocarril en España." Por Modesto Fernández para La Vanguardia, 2018.
- [7]- "Historia de los ferrocarriles de vía estrecha en España." Miguel Muñoz Rubio. Disponible en: <http://www.tstrevista.com/tstpdf/feve.pdf>
- [8]- Mapas de IGN.
https://www.ign.es/espmap/mapas_transporte_bach/pdf/TyC_Mapas_05_texto.pdf
- [9]- Mapa elaborado por la Fundación de Ferrocarriles Españoles.
- [10]- Declaración sobre la Red. ADIF, 2019.
- [11]- Organización del sector ferroviario. Página web del Ministerio de Fomento del Gobierno de España.
- [12]- "Energía limpia para el transporte: estrategia europea en materia de combustibles alternativos." Bruselas, 2013. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013PC0017&from=EN>
- [13]- Directiva 2014/94/UE del parlamento europeo y del consejo, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos. 22 octubre 2014. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2014/307/L00001-00020.pdf>
- [14]- Final report summary - CLEANER-D (Clean European Rail-Diesel) 2004/26/EC, 2009. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/91307/reporting/en>
- [15]- "Low carbon rail transport challenge, action plan" Climate Summit, 2014. Disponible en:
https://uic.org/com/IMG/pdf/uic_low_carbon_rail_transport_challenge-action_plan.pdf
- [16]- "Cumbre del Clima de París 2015, La Cumbre en 12 claves" por Samuel A. Pilar para RTVE, 2015. Disponible en: <http://www.rtve.es/noticias/20151130/cumbre-del-clima-paris-12-claves/1263241.shtml>
- [17]- "Acuerdo de París" web de la Comisión Europea. Disponible en:
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- [18]- "The sustainable freight railway: Designing the freight vehicle-track system for higher delivered tonnage with improved availability at reduced cost" SUSTRAIL, 2011. Disponible en: http://www.sustrail.eu/IMG/pdf/sustrail_d5_3_290715.pdf
- [19]- Informe anual 2017 OTLE, Ministerio de Fomento, Gobierno de España. Disponible en:



- <http://observatoriotransporte.fomento.es/NR/rdonlyres/EE4D9E3E-74A9-4C1F-A5FC-284D30BBAFFA/148831/INFORMEOTLE2017.pdf>
- [20]- "El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible." Claudio Rodríguez para Vía Libre, 2018. Disponible en: http://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/VLT13_04ClaudioRodriguez.pdf
- [21]- "Los puertos del proyecto CORE LNGas hive, preparados para abastecer GNL a barcos" artículo de prensa en Enagás, 2019. Disponible en: https://www.enagas.es/enagas/es/Comunicacion/NotasPrensa/2019_04_24_NP_CORE_LNGas_hive_Algeciras
- [22]- Informe anual 2018 y notas de prensa, REGANOSA. Disponible en: <http://www.reganosa.com/es>
- [23]- "Eficiencia energética y electrificación." Revista científica DELOITTE ENERGIA , 2018. Disponible en: <https://www2.deloitte.com/es/es/pages/strategy/articles/descarbonizacion-eficiencia-energetica-electrificacion.html>
- [24]- Cuadernos de Energía. Deloitte España, 2018.
- [25]- "Comienzan en Asturias las pruebas de tracción ferroviaria con GNL" Vía Libre Revista Técnica, 2018.
- [26]- "Renfe ensayará en Asturias la primera prueba del mundo de tracción de trenes con gas licuado" recorte de prensa de EFE para La Voz de Asturias, 2016.
- [27]- Página web de RENFE.
- [28]- Página web www.listadotren.es
- [29]- "Historia de los motores de combustión interna" Jorge Enrique Gaviria-Ríos, Jorge Hernán Mora-Guzmán, Hohn Ramiro Agudelo, 2002. Disponible en: <http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/326361>
- [30]- Apuntes termodinámica. Curso 2015. Universidad de Cantabria. Disponible en: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=137>
- [31]- Apuntes de Refino Petroquímico. Curso 2014. Universidad de Cantabria. Disponible en: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=68>
- [32]- "Motor de cuatro tiempos de inyección de combustible - Ciclo Diésel", Prof. Eduarno J. Stefanelli. Disponible en: <https://www.stefanelli.eng.br/es/ciclo-diesel-motor-cuatro-tiempos/>
- [33]- "Motores térmicos. Motor de explosión. Motor diésel." por Miguela Morones, 2015. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3070668/>
- [34]- "Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050" Deloitte energía revista científica, 2017. Disponible en: <https://perspectivas.deloitte.com/hubfs/Campanas/Estudio-descarbonizacion-2017/Descarbonizacion-Transporte-Deloitte-Espana.pdf?hsCtaTracking=a9b2812f-9c80-486c-9606-1bfb44b9e124%7Ca19b3e1d-f223-408c-951c-0e646d18bb76>
- [35]- "Menos diésel...menos CO2" Amador Robles para Vía Libre, 2017. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/3_ANALISIS.pdf
- [36]- "Análisis de las oportunidades medioambientales y económicas de la electrificación de una vía ferroviaria" Javier Santander Gimeno para Vía Libre

- Técnica, 2017. Disponible en: http://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/VLT13_03JavierSantander.pdf
- [37]- "Combustibles y vehículos alternativos: combustibles y nuevas tecnologías de vehículos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes." IDAE, 2011. Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/combustibles-y-vehiculos-alternativos-combustibles-y-nuevas-tecnologias-de-vehiculos-que-reducen-las>
- [38]- "Gas natural. Características, distribución y aplicaciones industriales." E. Borrás Brucart, 1987. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=lang_es&id=QKM6R6OInP8C&oi=fnd&pg=PR11&dq=gas+natural+&ots=XuJ0Ryow2d&sig=PrOq3NYhhdUS4y0oQT4B9QnK-rg#v=onepage&q=gas%20natural&f=false
- [39]- "La contribución del gas natural a la reducción de las emisiones a la atmósfera en España." Fundación Gas Natural, 2009. Disponible en: <http://fabregaspere.com/blog2/wp-content/uploads/2014/09/2009.12.03.La-contribucion-del-gas-natural-a-la-reduccion.pdf>
- [40]- "Variables Significativas del proceso de combustión del Gas Natural." Gloria Villaflor, Graciela V, Morales y Jorge Velasco, 2008. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v19n4/art08.pdf>
- [41]- Apuntes de Tecnología de los combustibles. Curso 2015. Universidad de Cantabria.
- [42]- "BP statistical review of World Energy." Edición 68, 2019. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- [43]- "La creciente necesidad de seguridad de suministro de gas en Europa (infografía)" Noticias del Parlamento Europeo, 2017. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20170911STO83502/la-creciente-necesidad-de-seguridad-de-suministro-de-gas-en-europa-infografia>
- [44]- "El gas natural en España. Reservas, extracción y producción." Artículo de Energía y Sociedad. Disponible en: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/el-gas-natural-en-espana/>
- [45]- "El único yacimiento de gas en España multiplicará por cuatro su producción en 2020." Artículo de Raúl Pozo para Voz Pópuli, 2018. Disponible en: https://www.vozpopuli.com/economia-y-finanzas/unico-yacimiento-Espana-multiplicara-produccion_0_1203179812.html
- [46]- "Aumenta el suministro de gas ruso a Europa." Por Euronews, 2019. Disponible en: <https://es.euronews.com/2019/01/30/aumenta-el-suministro-de-gas-ruso-a-europa>
- [47]- "¿Gas por un tubo para Europa?" Por Félix Flores, La Vanguardia, 2019. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/internacional/20190515/462244747745/gas-para-europa-proyecto-corredor-de-gas-del-sur-comision-europea-azerbaiyan-rusia.html#linkcomments>



- [48]- ¿Por qué la guerra comercial entre EEUU y China no durará?" por Matt Egan para CNN, 2019. Disponible en: <https://cnnespanol.cnn.com/2019/05/14/por-que-la-guerra-comercial-entre-estados-unidos-y-china-no-durara/>
- [49]- "Estados Unidos sigue tensando la cuerda con Irán: qué busca y qué puede pasar." Por Fernando Arancón para Eldiario.es. Disponible en: https://www.eldiario.es/internacional/Unidos-sigue-tensando-cuerda-Iran_0_899060807.html
- [50]- "¿Qué se juega España y la UE en Argelia, un socio estratégico esencial?" Por EuroEFNews, 2019. Disponible en: <https://euractiv.es/section/politicas/linksdossier/que-se-juegan-espana-y-la-ue-en-argelia-un-socio-estrategico-esencial/>
- [51]- "Irán, un argumento más en la disputa entre EEUU y Rusia." por Agustín Fontenla para Eldiario.es, 2017. Disponible en: https://www.eldiario.es/internacional/Iran-argumento-disputa-Unidos-Rusia_0_660035001.html
- [52]- "Estudio de los factores que inciden en el desempeño de motores de encendido provocado (MEP) convertidos a gas natural." Por I.Q. Diego Alberto Castaño, 2003. Disponible en: <http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/64/1/EstudioFactoresQueIncidenDesempe%C3%B1oMotoresEncendidoProvocadoConvertidosGasNatural.pdf>
- [53]- "Motores diésel y de gas de alta compresión." Edgar J. Kates y William E. Luck, 2003. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=UjtKifjkrYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=motor+diesel+funcionamiento&ots=MDG-UxvYgQ&sig=08iACxiikz7-sQ63N8Sz_JyFc2o#v=onepage&q=motor%20diesel%20funcionamiento&f=false
- [54]- "Motores de combustión interna alternativos." Por F. Payri, 2011. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70998/IPP-Payri%3bDesantes%20%20MOTORES%20DE%20COMBUSTI%C3%93N%20INTERNA%20ALTERNATIVOS.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [55]- "Adaptación de un motor diésel para su funcionamiento con gas natural en modo dual." Por D. Diego Díez, 2016. Disponible en: http://gasnam.es/wp-content/uploads/2016/11/MotorDieselDual_TFM_Diez-Bravo_Tinaut_21nov2016p.pdf
- [56]- "Online prediction of the piston maximum temperature in dual-fuel engine." Por Youyao Fu y Bing Xiao, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Diesel-natural-gas-dual-fuel-engine-control-system_fig4_313681629
- [57]- "EGR Systems for Diesel Engines." Por Simon Reifarh, 2010. Disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:305816/FULLTEXT01>
- [58]- "Performance and emissions of a dual-fuel pilot diesel ignition engine operating on various premixed fuels." Por Amin Yousefi, Madjid Birouk, Benjamin Lawler y Ayatallah Gharehghani, 2015. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415009012>



- [59]- "Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG" por K.Cheenkachorn, C. Poompipatpong y C. Gyeung para Energy 53, Elsevier, 2012.
- [60]- "Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR" por M.M. Abdelaal y A.H. Hegab para la revista IREC 2011, 2012. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412002415>
- [61]- Apuntes de Transporte, Distribución y Logística Energética. Curso 2018. Universidad de Cantabria.
- [62]- "Plantas regasificadoras de Gas en España." Artículo de El Comercio, 2018. Disponibil en: <https://www.elcomercio.es/economia/plantas-regasificadoras-espana-20180611012750-in.html>
- [63]- Real Decreto 984/2015.
- [64]- Norma UNE 60250.
- [65]- Planta satélite de GNL adaptada a "El Hierro 100% renovable", Gonzalo de la Peña, 2014.
- [66]- Sitio web de Lapesa S.A.
- [67]- "Estudio de viabilidad técnico-económica para la construcción de una planta de licuefacción." Roberto Díaz Herrera, 2010. Disponible en:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11691/TL-524-M.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [68]- Catálogo Stralis NP IVECO, 2018. Disponible en:
https://www.iveco.com/Spain/Documents/Cat%C3%A1logo%20Stralis%20NP_Pure%20Power_H1716601ES%20marzo.18.pdf
- [69]- 69- "SYSTEMS FOR DELIVERING LIQUIFIED NATURAL GAS TO AN ENGINE", Dennis N, Bingham; Bruce M, Wilding; James E, O'Brien; Ali S, Siahpush; Kevin B, Brown, 2000.
- [70]- Datos de combustibles del IDAE. Disponibles en: <https://www.idae.es/estudios-informes-y-estadisticas>
- [71]- Página web de RENFE. Nuestros trenes.
- [72]- "Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás." Por Jorge Eduardo Arango Gómez para UNC, 2012. Disponible en:
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6964/8631>
- [73]- "Gas Licuado del Petróleo: Propano, Butano, Precios, Instalación" Artículo científico de Propanogas. Disponible en: <https://propanogas.com/faq/gas-licuado>
- [74]- "Gas Licuado Petróleo (GLP): Una mirada en el Perú" por Jaime Santillana Soto. Disponible en: <https://www.ssecoconsulting.com/glp-una-mirada-en-el-peruacute.html>
- [75]- "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN VEHÍCULO MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A DIESEL, CON UN SISTEMA DE INYECCIÓN GLP COMO COMBUSTIBLE DE APORTE." Por Fabián Alberto Sarmiento Ortiz y Milton Andrés Núñez Ramos, 2018. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7620>



- [76]- "Disminución de la toxicidad de los motores diésel mediante el empleo del GLP." Facultad de Ingeniería Mecánica en Lima, Perú. 1999. Disponible en: <http://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/315>
- [77]- "Aplicación de un programa de cálculo térmico para comprobar el funcionamiento de un motor Diésel Perkins modelo C4.236.V - gasodiésel mediante análisis comparativo." Por Arturo Maza Rubina, 2015. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_e8c44ed600add2548f72c8291d613b52
- [78]- "Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kW en modo diésel-gas licuado de petróleo." Por los alumnos Carlos Forero, Jorge Arango y Fabio Sierra de la Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [79]- "Descripción de la estadística de GLP en España." Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, 2019. Disponible en: <https://www.cnmec.es/estadistica/estadistica-gases-licuados-del-petroleo-glp>
- [80]- Operadores al por mayor de GLP. Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España. Disponible en: <https://energia.gob.es/GLP/Requisitos/Paginas/requisitos-operador.aspx>
- [81]- "GLP como combustible alternativo para motores diésel con la finalidad de reducir la contaminación del aire." Por Fernando Chica, Fabricio Espinoza y Néstor Rivera. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8365/1/Gas%20licuado%20de%20petr%C3%B3leo%20como%20combustible%20alternativo%20para%20motor%20diesel%20con%20la%20finalidad%20de%20reducir%20la%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire.pdf>
- [82]- "Tipos de aditivos para motores diésel." Artículo en Blog "Reparación de vehículos. Disponible en: <https://blog.reparacion-vehiculos.es/tipos-de-aditivos-motores-diesel>
- [83]- "Consejo de Seguridad. 13- Manipulación de Hidrógeno." ABELLO LINDE. Disponible en: https://www.abellolinde.es/es/images/CS_13_%20v%2012%20%28manipulaci%C3%B3n%20de%20hidr%C3%B3geno%29_tcm316-25939.pdf
- [84]- "El caso de la producción de Hidrógeno." Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2009.
- [85]- "Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales." Por Cristian Familiar Xaudaró, 2011. Facultad de Náutica de Barcelona.
- [86]- "Investigación experimental de las emisiones y desempeño de un motor de combustión interna diésel enriquecido con hidrógeno." Nicolás René Castro Soruco, 2018.
- [87]- "Hidrógeno. Aplicación en motores de combustión interna." Por Marc Fábrega Ramo, 2009.
- [88]- Apuntes de Renewable and Alternative Energies. Curso 2014. Disponible en: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=69>
- [89]- "El hidrógeno: metodologías de producción." Por José Luis G. Fierro para CSIC. Disponible en:



[http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno metodologias de produccion](http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion)

- [90]- Revista "Progress in energy and combustion science." Volumen 41, 2014.
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/journal/progress-in-energy-and-combustion-science/vol/41/suppl/C>
- [91]- "Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno." Antonio González García-Conde, 2010.
- [92]- ISO 15916.
- [93]- Revista científica: Asociación Argentina del Hidrógeno. Año XI-diciembre 2007.
Disponible en:
[http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/info/Magazine H2 Diciembre 2007 - SP.pdf](http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/info/Magazine_H2_Diciembre_2007-SP.pdf)
- [94]- Elementos comerciales encontrados en: Tuadco.com.
- [95]- Estudio realizado por N, Saravanan y G, Nagarajan para Applied Energy, en 2009.
- [96]- Estudios realizados por Freymann y Eichseder, 2003.
- [97]- "An insight on hydrogen fuel injection techniques with SCR system for NOx reduction in a hydrogen-diesel dual fuel engine," N,Saravan, G,Nagarajan, International Journal of Hydrogen energy, Chennai, India 2009
- [98]- "El Gas Natural para coches es más interesante que el GLP, pero en España hay que ser un héroe para llenar el depósito." Artículo de Alejandra Otero, 2018.
- [99]- Portal web de Gasnam.
- [100]- Portal web de Asociación de Operadores de GLP.
- [101]- INE, datos 2019.
- [102]- ICANE, datos de 2012 sobre pasajeros del transporte ferroviario.
- [103]- FEVE. "Historia del Ferrocarril: FEVE - Geografía Ferroviaria."
- [104]- Sitio web Ferropedia.
- [105]- "35 accidentes en carreteras y seis horas sin trenes a León." E.García para El Comercio, 16 de noviembre 2019.
- [106]- "El tren Oviedo-Santander, obligado a parar en Llanes por falta de combustible diésel." Dani Busto para El Comercio, 19 de noviembre 2019. Disponible en:
<https://www.elcomercio.es/asturias/tren-oviedo-santander-para-llanes-falta-combustible-20190819215458-nt.html>
- [107]- "Una avería obliga a detener en Torrelavega el tren que discurre entre Santander-Oviedo" El diario Cantabria.es, 2019. Disponible en:
<https://www.eldiariocantabria.es/articulo/cantabria/averia-detiene-torrelavega-tren-completa-recorrido-santander-oviedo/20190404110050058915.html>
- [108]- "Están dejando morir de inanición a los cercanías con constantes llamamientos al AVE, "el mayor cáncer en materia ferroviaria"". El Diario Cantabria.es, 2019.
Disponible en: <https://www.eldiariocantabria.es/articulo/cantabria/estan-dejando-morir-inanicion-cercanias-constantemente-llamamientos-ave-mayor-cancer-materia-ferroviaria/20191108193621067288.html>
- [109]- "Análisis de viabilidad económica de la línea de alta velocidad La Coruña-Bilbao." Trabajo de Alfredo Ruiz Jaldón, junio de 2016.



- [110]- Artículo de Sergio Guinaldo “Ni diésel, ni gasolina, ni eléctrico: así transformó Javier su Audi 6 en un coche Auto gas” publicado en El Español el 27 de enero de 2019.
- [111]- www.motorpasion.es
- [112]- www.biofutur.net
- [113]- Sitio web de CALVERA S.A.
- [114]- “Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro.” Por Andrés Causapé Rodríguez, 2006.
- [115]- “El hidrógeno como gas real, Factor de compresibilidad,” Publicado el 8 de octubre de 2017 por Oscar Santiago en el blog “Apilados”
- [116]- Taller de química del centro I.E.S. San Fernando (Madrid): Esmeralda Cuthbert, Antonio Colino y Javier Jiménez.
- [117]- Sitio web del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo del Gobierno de España.
- [118]- “Manufacturing cost analysis for proton Exchange membrane water electrolyzers” realizado por Ahmad Mayyas, Mark Ruth, Bryan Pivovar, Guido Bender y Keith Wipke para NREL (National Renewable Energy Laboratory), en agosto de 2019.



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

