



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

PROYECTO DE CONVERSIÓN A GNC/GLP DE UN VEHÍCULO CON MCI DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO COMO ALTERNATIVA A LA HIBRIDACIÓN ELÉCTRICA

Autor: Carlos Menéndez Ramos

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Agosto de 2019

PROYECTO DE CONVERSIÓN A GNC/GLP DE UN VEHÍCULO CON MCI DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO COMO ALTERNATIVA A LA HIBRIDACIÓN ELÉCTRICA.

Autor: Carlos Menéndez Ramos.

Director: Juan Norverto Moriñigo.

Entidad colaboradora: Universidad Pontificia de Comillas (ICAI).

RESUMEN

El gas natural comprimido (GNC) y el gas licuado de petróleo (GLP) son una solución como combustible alternativo en la búsqueda de una movilidad sostenible y grandes grupos de fabricantes hacen uso de ellos. En particular el Grupo Volkswagen se especializa en el uso de GNC y en cambio el Grupo Fiat Chrysler Automobiles en GLP.

Las razones por las que los fabricantes empiezan a desarrollar estos combustibles son múltiples. Para empezar, estos combustibles son más limpios, reduciendo en un 23% las emisiones de CO₂, que es la causante principal del efecto invernadero, en el caso del GNC y un 10% en el caso del GLP comparado con la gasolina. También reduce emisiones de azufre, ya que estos combustibles pueden ser tratados antes de su uso y se eliminan los compuestos de azufre. En cuanto al NO_x, las emisiones se reducen a un tercio de las del diésel. Pero las emisiones de compuestos químicos no son las únicas que se reducen, también las acústicas, que se reducen en hasta un 50 %. La reducción de estas emisiones hace que los vehículos con estos combustibles tengan el distintivo medioambiental ECO.

A parte de la reducción de las emisiones, el uso de GNC/GLP conlleva otras ventajas como es el ahorro en combustible. El menor precio de estos combustibles comparados a los combustibles tradicionales hay que sumarle a un menor consumo, por lo que el ahorro es considerable a lo largo del año, llegando a ser de más de 500 € en el caso del GLP y de más de 300 € en el caso del GNC.

Pero el uso de estos combustibles no supone solo ventajas, también tiene inconvenientes. Un inconveniente es el reducido número de estaciones de servicio, actualmente en España hay 659 estaciones de GLP y 66 en las que se pueden repostar GNC, este número es pequeño en comparación con las 11.609 que hay de gasolina y diésel. El reducido número de estaciones hace que sea complicado implantar estos combustibles. Este no es el único problema con el repostaje del GNC ya que debido a que debe ser suministrado a 250 bares la estación de repostaje requiere de sistemas complejos.

Otro problema que surge con el uso de estos combustibles es la pérdida de rendimiento del motor debido a las propiedades de los nuevos combustibles. La potencia de los motores viene dada por el poder calorífico inferior y en el caso de los combustibles gaseosos dicho valor por unidad de volumen es menor que el de la gasolina o el diésel, reduciendo la potencia del motor.

Para solucionar dicha pérdida se puede realizar ciertos cambios en el funcionamiento del motor, en particular en el ciclo de combustión. Las soluciones más comunes son el Ciclo Miller y Atkinson, que cambian el momento de cierre de admisión. En el caso del Ciclo Miller la admisión se cierra antes, de esta forma se consigue que la mezcla sea más homogénea en la cámara de combustión. El Ciclo Atkinson cierra más tarde la admisión, de esta forma se reduce la carrera de admisión, pero se mantiene constante la de expansión, de esta forma aumenta el rendimiento efectivo.

Estos no son los únicos cambios que se realizan en el motor, también es necesario revisar el sistema de inyección. Actualmente la gran mayoría de vehículos vienen con sistemas de inyección directa, que se refrigeran por el paso de combustible líquido, pero cuando usan combustible gaseoso sufre de sobrecalentamiento. Para solucionar este problema hay dos posibilidades: usar un anillo de teflón o un sistema de inyección indirecta para el combustible gaseoso, que mezcle el combustible y el aire fuera de la cámara de combustión.

A parte de cambios en el motor hay que realizar otros cambios en el vehículo. En el caso del GNC hay que añadir al vehículo una toma de llenado, que posea una válvula que evita el retorno de combustible. También habrá que añadir un depósito que sea capaz de soportar presiones altas y que no se rompa en caso de impacto. Del depósito salen las tuberías del gas, que pueden ser rígidas o flexibles. Estas tuberías llevan el gas hasta la entrada del motor donde habrá que añadir un reductor para bajar la presión del gas. Dentro del vehículo se añadirá un selector para elegir el combustible que se quiere utilizar y un indicador de nivel para saber cuanto combustible queda en el depósito.

Los sistemas del GLP se parecen a los del GNC, pero con algunas diferencias. El depósito no es tan sofisticado, ya que el GLP no requiere de presiones tan altas, aun así, ha de ser capaz de soportar grandes impactos. Una diferencia con el GNC es el uso de un vaporizador para cambiar de estado el combustible, a estado gaseoso, y después, como con el GNC, se añade un reductor para bajar la presión. Hay que añadir al sistema un conmutador y una centralita, de forma que se este leyendo constantemente los datos de presión y temperatura de motor y así se ajusten el consumo y las revoluciones del motor para que la combustión sea lo más eficiente posible, reduciendo el consumo y aumentando el rendimiento. Por último, habrá que añadir una electroválvula que corte el suministro de GLP cuando se use gasolina, esté encendiendo o este apagado el vehículo. Todos estos sistemas aseguran la seguridad total del vehículo, siendo incluso mejor que los vehículos con gasolina.

Todos estos cambios han de realizarse en talleres que estén cualificados para ello. Ellos serán los responsables de realizar la transformación, añadiendo el kit que requiera el vehículo. Los kits variarán en función del vehículo y de la calidad que el conductor quiera y por lo tanto lo hará también el precio. En el caso del GLP varía desde 1.149 € en el caso de un kit básico a él más sofisticado con inyección directa en un motor de 8 cilindros que supera los 3.000 €, en cuanto a un kit de GNC va desde 1.500 € a los 2.500 €. Siendo estos precios asequibles para la mayoría de los conductores.

A los precios antes mencionados hay que añadirle el coste de hacer la ITV de homologación que garantiza la seguridad del vehículo. En el proceso de homologación se observa que los componentes cumplan los requisitos que se nombran en las diferentes regulaciones, en el caso del GNC la nº 110 de la CEPE y en el GLP la nº 115. En dichos reglamentos se especifican las características de los componentes del sistema y los ensayos que debe de superar. Una vez superado el proceso de homologación ya se podrá circular con el nuevo vehículo con el combustible gaseoso.

CONVERSION TO CNG/LPG OF A VEHICLE WITH AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH LIQUID FUEL AS AN ALTERNATIVE TO ELECTRIC HYBRIDIZATION.

Autor: Carlos Menéndez Ramos

Director: Juan Norverto Morínigo

Collaborating entity: Universidad de Pontifica Comillas (ICAI)

ABSTRACT

The compressed natural gas (CNG) and the liquefied petrol gas (LPG) are a solution as alternative fuels in the search for a solution to a sustainable mobility and big companies are making use of it. In particular the Volkswagen Group is specialized in the use of CNG and the Fiat Chrysler Automobiles group is specialized in LPG.

The reasons why the manufactures are using those fuels are a few. First of all, they are clean fuels, CNG reduces 23% the emissions of CO₂ and LPG reduces 10% compared to gasoline, CO₂ is the main responsible for the greenhouse effect. Sulfur emissions are also reduced because these fuels can be treated before its usage and therefore, they remove the sulfur components. NO_x emissions are reduced to a third of what a diesel engine produced. But the emissions are not the only thing reduced, the engine noise is reduced, up to a 50%. The reduction of the pollution produced by the vehicle is what gives these types of fuel the ECO sticker.

Apart from the reduction of emissions, the use of CNG/LPG has other advantages such as saving money in fuel. The lower price of these fuels compared to traditional fuels has to be added up to the lower consumption and therefore savings in fuel at the end of the year are considerable. It can be over 500 € in the case of LPG and 300 € in the case of the CNG.

The use of these fuels has not only advantages, it also has drawbacks. For instance, the low number of fueling stations, in Spain there are only 659 stations of LPG and 66 in which you can refuel CNG, this number is really small compared to the 11.609 stations in which is possible to refuel gasoline and diesel. The small number of stations makes it harder to spread the use of this fuels. This is not the only issue related to refueling CNG, since the conditions at which the systems have to work are really complex, they have to support pressures up to 250 bares.

Another issue that appears with this engine is the loss of performance in the engine due to the properties of the new fuels. The power of an engine is a function of many variables, one of them is the heat value and the gaseous fuels have a lower value per unit of volume than the traditional fuels and therefore the engine has less power.

To solve the loss of performance some changes in the combustion process can be done. The most common solutions are the Miller Cycle and the Atkinson Cycle, that basically change the time when the admission is closed. In the case of the Miller Cycle the admission is closed earlier, by this the mixture can spread all over the combustion chamber and in a more homogeneous way. The Atkinson Cycle closed the admission later, compared to the Otto Cycle, and by this solution the admission run is smaller, although the expansion stays the same, and by this the effective performance stays increases.

These are not the only changes made in the engine, it is also necessary to revise the injection system. Nowadays the majority of the vehicles have a direct injection system, that cools down with the liquid fuels, but this system suffers from overheating if instead of a liquid fuel uses a gaseous fuel. To solve this problem there are two possibilities: the first option is to add a teflon ring to the part of the system that is inside the combustion chamber, the second one is to use an indirect injection system for the gaseous fuel, this system mixes the air and the fuel outside the combustion chamber.

Apart from the changes in the engine it is necessary to make some other ones on the vehicle. In the case of the CNG, a filling hole has to be added, this system has to have a no return valve when fueling. It is also necessary to add a tank for the new fuel, it has to be able to handle high pressure and also impacts. Pipelines will go from the tank to the engine, there has to be two types of pipelines: rigid and flexible. Before reaching the engine, a pressure redactor is added, this helps to a correct behavior of the engine. Inside the vehicle there is a dial which gives the driver the chance to select the fuel they want the engine to work with and also a device that shows how much CNG is left in the tank.

The systems used for LPG are similar to the ones for CNG, but with some differences. The tank is not as sophisticated as the one used for CNG because LPP does not have to deal with really high pressure, but it has to be able to resist to impacts as well. Another difference is the use of a vaporizer, that changes the state of the fuel from liquid to gaseous, and after that, like in the CNG system, a redactor is added, so that the pressure is the correct one for the engine. A switcher and a small computer have to be added to the system, they will be reading the data send from the temperature and pressure sensor, then analyzing it and controlling he engine so that the consumption is reduced, and the performance is still high. Finally, an electro-valve is added before the engine so that whenever the LPG is not used no gaseous fuel is supplied to the engine, or whenever the engine is turn off or started. All these systems assure the safety of the vehicle, it makes it even more secure than a regular vehicle.

All these changes have to be made in a qualified workshop. They will be responsible for the transformation of the vehicle, adding the kit that the vehicle requires. The kits varies depending on the vehicle, for instance the size of the engine (cylinder, power), and the quality that the

driver wants and therefore the prize will change as well. In the case of the LPG a basic kit cost 1.149 € and the most sophisticated with direct injection and for an engine of 8 cylinders is over 3.000 €. The kit for CNG goes from 1.500 € to 2.500 €. These prices can be paid from many potential drivers.

To the prices said before it has to be added the cost of the homologation of the vehicle that guarantees the safety of the vehicle. The homologation process consists in seeing that all components fulfill all the requirements in the different regulations, in the case of CNG is the n° 110 of the ECE and in the LPG is the n° 115 of the ECE. In both regulations the characteristics of the components are specified as well as the tests that have to be done on them. Once the homologation process is done then the vehicle can be drive in the road with gaseous fuel.

Índice de Contenido

1. Introducción.....	8
2. Objetivos del proyecto.....	9
3. Estado del arte.	10
3.1 Fabricantes de vehículos con combustibles alternativos.	10
3.2 Distintivos medio ambiental.	12
4. Combustibles alternativos.....	14
4.1 Gas Natural Comprimido.....	14
4.2 Gas Licuado de Petróleo.....	17
5. Ventajas e inconvenientes de la conversión del vehículo a GNL/GLP.	20
5.1 Ventajas de la conversión del vehículo a GNC/GLP.	20
5.1.1 Reducción de emisiones de gas del escape.....	20
5.1.2 Reducción del ruido.....	22
5.1.3 Coste del combustible.....	24
5.1.4 Coste de transformación.	25
5.2 Inconvenientes de la transformación del vehículo a GNC/GLP.....	25
5.2.1 Escasos puntos de repostaje.....	25
5.2.2 Efectos secundarios de la transformación.	27
5.2.3 Pérdida de potencia debido al nuevo combustible.....	28
6. Funcionamiento del motor de un vehículo con GNC/GLP.	30
6.1 Ciclo Otto.	30
6.2 Ciclos alternativos para mejorar el rendimiento.....	32
6.2.1 Ciclo Miller.....	32
6.3 Distintos tipos de inyección.....	36
6.3.1 Inyección directa.....	36
6.3.2 Inyección indirecta.	37
6.4 Tratamiento de gases de escape.....	38
6.5 Sistema bi-fuel.	40
7. Componentes afectados.....	42
7.1 Vehículos transformados a GNC.....	42
7.1.1 Depósito de GNC.....	42
7.1.2 Tuberías de GNC.....	44
7.1.3 Toma de llenado.	44
7.1.4 Válvulas.....	46
7.1.5 Indicador de nivel y selector de combustible.	46
7.1.6 Seguridad.....	47
7.2 Vehículos transformados a GLP.....	48

7.2.1 Depósitos de GLP.....	49
7.2.2 Tuberías de GLP.....	50
7.2.3 Toma de llenado.	51
7.2.4 Reductor-vaporizador.	51
7.2.5 Conmutador y centralita.	52
7.2.6 Válvulas.....	53
7.2.7 Sensor de presión y temperatura.....	53
7.2.8 Seguridad.....	54
8. Costes de transformación.....	55
8.1 Coste de transformación de un vehículo a GNC.	55
8.2 Coste de transformación de un vehículo a GLP.	56
8.3 Coste de mantenimiento.	60
9. Proceso de homologación.....	61
9.1 Ensayos de homologación de vehículos.....	61
9.1.1 Aprobación de tipo.	61
9.1.2 Ensayo de homologación en condiciones reales de conducción.	62
9.1.3 Conformidad en servicio.	63
9.1.4 Nuevos reglamentos de homologación.....	63
9.2 Homologación de vehículos particulares.....	64
9.3 Normas específicas para combustibles gaseosos.....	65
9.3.1 Reglamento nº 110 de la CEPE.	65
9.3.2 Reglamento nº 115 de la CEPE.	67
9.3.3 Otros reglamentos.....	68
9.4 Inspección técnica de los vehículos con combustible gaseoso.	69
10. Conclusiones.....	72
11. Referencias.	76

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del Gas Natural en comparación con otros combustibles.....	16
Tabla 2. Relaciones de compresión de diferentes tipos de motores.....	17
Tabla 3. Propiedades del GLP en comparación con otros combustibles.....	18
Tabla 4. Emisiones por combustibles.....	21
Tabla 5. Precios de combustibles.....	24
Tabla 6. Valor de la resistencia a la tracción en función del valor límite de los componentes de los aceros.....	43
Tabla 7. Rango de temperaturas que soportan los depósitos de GNC.....	43
Tabla 8. Condiciones de trabajo de la toma de llenado.....	45
Tabla 9. Comparación de precios de los vehículos mostrados en el apartado 3 en su versión con y sin GNC.....	55
Tabla 10. Tabla de precios con IVA del kit Stag.....	56
Tabla 11. Comparación de precios de los vehículos mostrados en el apartado 3 en su versión con y sin GLP.....	57
Tabla 12. Tabla de precios con IVA de el kit ALEX.....	59
Tabla 13. Tabla de precios con IVA del kit Prins.....	59
Tabla 14. Condiciones de ensayo de conducción real.....	62
Tabla 15. Clasificación de defectos en vehículos con combustible gaseoso.....	70

Índice de imágenes

Imagen 1.	Diferentes opciones de vehículos que usan GNC.....	11
Imagen 2.	Diferentes opciones de vehículos que usan GLP.....	12
Imagen 3.	Distintivos medio ambientales.....	12
Imagen 4.	Niveles de ruido en dB según el vehículo.....	23
Imagen 5.	Ruido generado por diferentes combustibles.....	23
Imagen 6.	Estaciones de Gas Natural.....	26
Imagen 7.	Estaciones de GLP.....	27
Imagen 8.	Tanque de almacenamiento de un vehículo con GNC.....	28
Imagen 9.	Ciclo termodinámico de Otto.....	31
Imagen 10.	Curvas de carga de un Audi Q7 V12 2015.....	31
Imagen 11.	Diagramas de p-V de ciclos termodinámicos de Miller, Atkinson y Lenoir.....	32
Imagen 12.	Evolución del rendimiento del ciclo Miller con presión limitada a 90 bar en función de la relación de compresión relativa (r_c) en para distintos r	33
Imagen 13.	Diagrama p-V de un ciclo Miller con presión máxima 11 y relación de compresión constante ($r=12$).....	33
Imagen 14.	Rendimiento de los ciclos con presión máxima 90 bar en función de la relación de compresión relativa.....	35
Imagen 15.	Diagrama p-V del ciclo Atkinson, con relación de compresión $r=12$ y presión máxima 90 bar.....	35
Imagen 16.	Sistemas de inyección.....	36
Imagen 17.	Diferentes émbolos de motores con inyección directa.....	37
Imagen 18.	Sistema de inyección central (izquierda) y sistema de inyección multipunto (derecha).....	38
Imagen 19.	Relación entre NO_x y partículas.....	39
Imagen 20.	Sistema de inyección de un vehículo bi-fuel de GNC.....	40
Imagen 21.	Nuevos componentes del vehículo para el uso de GNC.....	42
Imagen 22.	Audi A4 Avant g-tron.....	44
Imagen 23.	Toma de llenado de GNC.....	45
Imagen 24.	Válvulas de cierre de depósito.....	46
Imagen 25.	Ensayos de impacto, delantero (izquierda) y lateral (derecha).....	48

Imagen 26.	Nuevos componentes para el uso de GLP.....	49
Imagen 27.	Depósitos de GLP para el uso vehicular.....	49
Imagen 28.	Tuberías flexibles para el uso vehicular.....	50
Imagen 29.	Disposición de la toma de llenado de GLP.....	51
Imagen 30.	Reductor-vaporizador.....	52
Imagen 31.	Unidad electrónica de control.....	52
Imagen 32.	Sensor de presión.....	53
Imagen 33.	Talleres que ofrecen la instalación de GLP, mantenimiento y comercializan equipos.....	58
Imagen 34.	Red de talleres asociados con Ircongas.....	60
Imagen 35.	Esquema del banco de pruebas del coche tipo.....	62
Imagen 36.	Marca de homologación de un componente para GNC/GNL.....	66
Imagen 37.	Marca de homologación del reglamento nº 115.....	68

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.	Composición del gas natural.....	14
Ecuación 2.	Potencia de un motor con gas natural como combustible.....	16
Ecuación 3.	Gasto anual en combustible.....	24
Ecuación 4.	Relación de potencia entre gasolina y GNC/GLP.....	28
Ecuación 5.	Relación de potencia de GNC y gasolina.....	29
Ecuación 6.	Calculo de las emisiones del escape.....	63

Índice de gráficas

Gráfica 1.	Consumo de gas natural (m ³) en 2015.....	14
Gráfica 2.	Consumo de barriles/día de GLP.....	17

1. Introducción.

La movilidad sostenible es uno de los mayores retos que afronta hoy en día la sociedad. Actualmente el parque de vehículos de España contiene 24.074.151[1] turismos. Entre todos estos turismos solo un 1,25% [1] dispone del distintivo ECO o CERO de la Dirección General de Tráfico, que se adjudica a los vehículos de hibridación eléctrica, enchufables y no enchufables, y a los de combustible alternativo como el Gas Natural Comprimido (GNC) o Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Para aumentar el número de vehículos con el distintivo ECO o CERO es necesario que varios sectores de la sociedad lleven a cabo ciertas medidas. Por ejemplo, es necesario que los gobiernos incentiven el uso de los vehículos más limpios, dando ayudas al que compra esta clase de vehículos, además, deben de regular y promover un mínimo de puntos de repostaje o recarga para que el uso de los vehículos ECO sea el mismo que uno vehículo tradicional. Los fabricantes deben de formar más sobre las conveniencias de estos vehículos invirtiendo más en publicidad haciéndolo más atractivo para el público. En cuanto a los ingenieros, tienen la responsabilidad de optimizar el uso de los nuevos combustibles y la nueva clase de motores, buscando mantener la autonomía, incrementando el rendimiento y la potencia y, lo más importante, reduciendo lo máximo posible las emisiones para producir el menor impacto posible en el medio ambiente.

Una de las soluciones que existe en el mercado, con la etiqueta ECO y CERO, la más común, o la más famosa, es la hibridación eléctrica con grandes fabricantes apostando por ella. Estos vehículos cuando funcionan únicamente con el motor eléctrico no producen emisiones, pero la carga de las baterías está muy limitada por lo que el uso del vehículo en estas condiciones no supera las decenas de kilómetros y luego se vuelve al motor de combustión y a las emisiones características de estos motores. Aunque tampoco cuando se usa el motor eléctrico se puede decir que sea completamente limpio ya que gran parte de la electricidad se produce en ciclos combinados, en los que es necesario quemar distintos combustibles para que el rendimiento y la producción sea el óptimo. En un futuro cuando la producción de electricidad venga totalmente de energías renovables, entonces si que se podrá decir que los motores eléctricos son completamente limpios.

Debido a los distintos inconvenientes de la hibridación eléctrica en este proyecto se centra en otra solución presente ya en el mercado: uso de combustibles gaseosos en particular gas natural comprimido y gas licuado de petróleo. Con esta solución obtendremos una mayor autonomía del combustible más limpio, aunque las emisiones producidas directamente del combustible gaseoso son mayores que las del híbrido eléctrico, pero su mayor uso hace que se compense. Además, la transformación del vehículo es barata haciéndola una opción muy interesante.

2. Objetivos del proyecto.

El proyecto tiene como objetivo principal el demostrar que la transformación de un vehículo para que utilice gas natural comprimido (GNC) o gas licuado de petróleo (GLP), en vez de gasolina o diésel, como una solución alternativa a la hibridación eléctrica o otros combustibles alternativos (hidrógeno). En el caso de este proyecto se centra en la transformación de vehículos de gasolina.

Para ello se estudiará las propiedades de ambos combustibles, mirando principalmente el poder calorífico y en particular el inferior (PCI) que nos dará la información suficiente para ver como se comporta el nuevo combustible.

Se mostrarán las ventajas e inconvenientes que tiene la transformación. De entre las numerosas ventajas, se desarrollarán aquellas sobre la reducción de emisiones, tanto de componentes químicos como de ruido, se demostrará el ahorro en combustible que supone el cambio de combustible, así como el claro ahorro que brinda en la transformación de vehículo si se compara con la adquisición de un nuevo vehículo. También habrá inconvenientes, de entre ellos destacan el reducido número de puntos de repostaje que hace que sea complicado que se expanda el uso de estos vehículos.

Una vez conocido las ventajas e inconvenientes, se explicará el funcionamiento del motor con el nuevo combustible, para ello se explicará el funcionamiento del Ciclo Otto y los cambios que son necesarios hacer, Ciclo Atkinson y Miller, para que el motor funcione correctamente y su rendimiento sea el máximo posible. Se estudiará si se puede utilizar la inyección directa y la indirecta con los combustibles alternativos.

Tras estudiar el funcionamiento del motor con el nuevo combustible y conociendo los requisitos del vehículo se pasará a diseñar y seleccionar las nuevas piezas del vehículo tratando de optimizarlo para que el coste sea el mínimo. Se propondrá también, diferentes talleres en España que transforman el vehículo, además, así como los costes del proceso.

El objetivo siguiente, tras realizar la transformación, será el comprobar si cumple todos los requisitos necesarios para poder homologarlo, pasar la ITV y poder matricularlo.

Todos estos pasos serán necesarios para demostrar que la transformación de un vehículo a GNC/GLP es la mejor opción para obtener un vehículo bajo en emisiones por un precio razonable.

3. Estado del arte.

El uso del GNC y del GLP está empezando a asentarse en el sector del automóvil, con grandes grupos apostando por esta tecnología de cara al futuro, debido a la sencillez y su impacto positivo en el medio ambiente, como queda demostrado con las pegatinas de emisiones introducidas por la DGT en España.

3.1 Fabricantes de vehículos con combustibles alternativos.

Debido al incremento de la demanda de vehículos con combustibles alternativos los fabricantes están invirtiendo cada vez más en esta tecnología, apostando cada uno por un tipo de combustible.

Este incremento de demanda ha sido especialmente grande en países de Latino América donde las reservas de gas natural son grandes y por lo tanto su uso es barato y está al alcance de más personas. Dentro de estos países destaca especialmente Argentina y Brasil donde la flota de vehículo que utilizan gas natural supera 1.7 millones [12]. En países como Irán la flota supera los 3 millones [12]. En cambio, en España la introducción del gas natural en el sector automovilístico está siendo más lento, debido principalmente a la falta de conocimiento de este tipo de vehículo, aunque poco a poco va aumentando la flota. Se espera que para 2025 la flota de vehículos de GNC llegue a 36.000 [12].

En cuanto al GLP, se pueden contabilizar 25 millones [21] de vehículos que lo utilizan en todo el mundo, de los cuales 6 millones [21] están en Europa. Los países que más vehículos tienen son Polonia, Turquía e Italia todos ellos superando los 350.000 [21]. España es uno de los países con la menor flota de todo Europa, las causas de pueden suponer las mismas que con el GNC, falta de conocimiento por parte de la sociedad, pero poco a poco va aumentando, especialmente con la implantación de puntos de repostaje en las estaciones de gasolina y diésel.

Debido a este incremento de la flota es posible distinguir dos tipos de fabricantes:

- Los que apuestan por el GNC: de entre todos, el Grupo Volkswagen es el que más ha invertido en el desarrollo de este tipo de combustible. Dentro de sus distintas marcas hay distintas opciones que satisfacen a distintos tipos de compradores, desde personas que utilizan el vehículo para su uso y disfrute personal, hasta para personas que lo necesitan medio de trabajo. También utiliza GNC como combustible la marca FIAT, con varios modelos en el mercado.



Audi A3 Sportback g-tron

- Potencia: 110 CV
- Capacidad de GNC: 14,4 kg
- Consumo de GNC: 3,3 kg/100 km
- Capacidad de gasolina: 50 l
- Autonomía total: 1.380 km
- Autonomía de GNC: 420 km



Seat Mii EcoFuel

- Potencia: 68 CV
- Capacidad de GNC: 11 kg
- Consumo de GNC: 3,2 kg/100 km
- Capacidad de gasolina: 10 l
- Autonomía total: 600 km
- Autonomía de GNC: 359 km



Volkswagen Golf TGI

- Potencia: 110 CV
- Capacidad de GNC: 15 kg
- Consumo de GNC: 3,4 kg/100 km
- Capacidad de gasolina: 50 l
- Autonomía total: 1.340 km
- Autonomía de GNC: 400 km



Fiat Panda 0,9 TwinAir Natural Power

- Potencia: 80 CV
- Capacidad de GNC: 12 kg
- Consumo de GNC: 3,1 kg/100 km
- Capacidad de gasolina: 35 l
- Autonomía total: n/d
- Autonomía de GNC: 380 km

Imagen 1: diferentes opciones de vehículos que usan GNC. [22]

- Los que apuestan por GLP: este combustible está mas extendido dentro de los fabricantes, como se demuestra con un mayor número de vehículos ya circulando. Las principales marcas que utilizan GLP son SsangYong, Fiat Chrysler Automobiles y Subaru. Aunque otros fabricantes como Opel, Hyundai o Ford también hacen uso de este tipo de combustible.

DATOS TÉCNICOS DEL OPEL CORSA 5P 1.4 90 GLP SELECTIVE 120 ANIV. 5P



- Combustible: GLP
- Cilindrada: 1.398 cc
- Potencia: 90 CV
- Par: 124 Nm
- Velocidad Máx.: 175 Km/h
- 0 a 100 km/h: 13,9 s
- Consumo Medio: 7,0 litros/100km
- CO₂: 114 g/km

DATOS TÉCNICOS DEL HYUNDAI I10 1.0 66 GLP



- **Combustible:** GLP
- **Cilindrada:** 998 cc
- **Potencia:** 66 CV
- **Par:** 90 Nm
- **Velocidad Máx.:** 153 Km/h
- **0 a 100 km/h:** 15 s
- **Consumo Medio:** 2,7 litros/100km
- **CO₂:** 104 g/km

DATOS TÉCNICOS DEL FIAT PANDA 1.2 69 GLP LOUNGE



- **Combustible:** GLP
- **Cilindrada:** 1.242 cc
- **Potencia:** 69 CV
- **Par:** 102 Nm
- **Velocidad Máx.:** 164 Km/h
- **0 a 100 km/h:** 14,2 s
- **Consumo Medio:** 3,7 litros/100km
- **CO₂:** 106 g/km

Imagen 2: diferentes opciones de vehículos que usan GLP. [23]

3.2 Distintivos medio ambiental.

Dentro de las ventajas que supone la introducción del GNC y el GLP está la adjudicación del distintivo ECO por parte de la Dirección General de Tráfico.

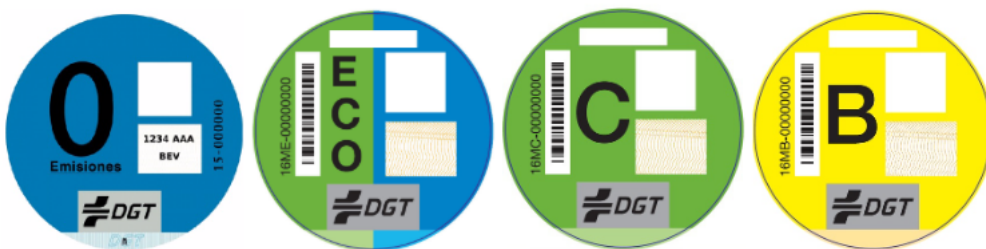


Imagen 3: distintivos medio ambientales. [24]

Dicho distintivo se le concede a los turismos y a los comerciales ligeros que están clasificados como híbridos enchufables con autonomía <40km, los no enchufables y los vehículos que usan GLP y GNC. Además, debe cumplir el nivel de emisiones EURO 4/IV, EURO 5/V y EURO 6/VI si es gasolina y EURO 6/VI si es diésel.

El poseer el distintivo medio ambiental ECO posee ciertas ventajas que harán más atractivo el uso del GNC y GLP, aumentando así el número de posibles compradores. Dichas ventajas son:

- El poder circular en cualquier escenario de contaminación en las grandes ciudades.
- Tienen una bonificación de hasta el 100% en las tarifas de aparcamiento regulado, en el caso de la ciudad de Madrid llega hasta el 50% en la zona SER.
- Una bonificación de hasta un 80% en el Impuesto Municipal de Circulación, esto se aplica durante los primeros 6 años desde la matriculación en los coches de GLP y GNC.
- Descuento en las autopistas de peaje, hasta de un 30% utilizando Eco Vía T.
- Acceso libre al carril BUS/VAO con cualquier número de ocupantes a bordo.

Todas estas ventajas hacen que un conductor habitual le resulte atractivo el modificar su vehículo para que sea posible el uso de GNC/GLP o la compra de un nuevo vehículo que ya integre el uso de cualquiera de los combustibles alternativos.

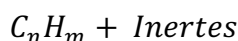
4. Combustibles alternativos.

Con el objetivo de mejorar la movilidad y de que evolucione hacia un futuro más ecológico, se han desarrollado dos tipos de combustibles: Gas Natural Comprimido (GNC) y el Gas Licuado de Petróleo (GLP), también denominado el Autogas.

Dichos combustibles poseen cualidades que los hacen atractivos para el consumidor, como son un aumento en la autonomía y una reducción en el coste del combustible. Es por esto por lo que resulta interesante el estudio de ambos carburantes.

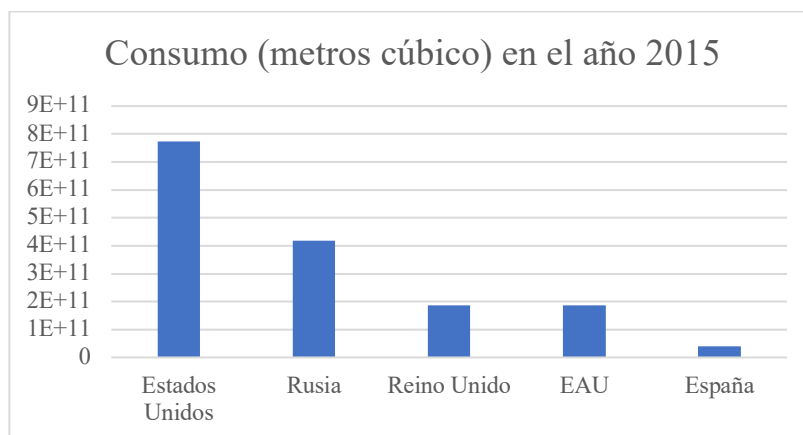
4.1 Gas Natural Comprimido.

El Gas Natural Comprimido (GNC) es una forma de tratar el gas natural para que ocupe el mínimo espacio posible sin cambiarle ni el estado ni las propiedades. Dichas propiedades vienen definidas por su composición, que se puede expresar de la siguiente manera:



Ecuación 1: Composición del gas natural [2]

La composición del gas natural depende también de su procedencia, en la Tierra hay una reserva total de 187 trillones de m³[2]. Esta reserva está repartida por todo el mundo, el 42,8% [2] está en Oriente Medio mientras que Eurasia posee el 30,4% [2] de las reservas. El consumo actual del gas natural es de 3,2 trillones de m³, por lo que las reservas de gas pueden asegurar 60 años. Dicho consumo proviene principalmente de Asia y del Pacífico, con el 71% [2].



Gráfica 1: consumo de gas natural (m³) en 2015. [7]

El consumo europeo del gas natural en los últimos años se centra en la generación de electricidad, en los ciclos combinados. Debido al aumento del uso de energías renovables, especialmente en países como España, el consumo del gas natural ha caído. Esta caída del consumo se verá contrarrestada en los próximos años con la introducción del gas natural en el sector transportes y para ello se ha desarrollado la capacidad de almacenar de forma segura el gas natural.

La capacidad de almacenar el gas natural es el salto necesario para poder entrar en el sector de la movilidad. Se han desarrollado dos formas de almacenarlo: en estado gaseoso y líquido.

En estado líquido recibe el nombre de Gas Natural Licuado (GNL). Para alcanzar este estado es necesario bajar la temperatura del gas a entre -162°C y -183°C [2]. Debido al cambio de estado, el volumen que ocupa se reduce por un factor de 580 [2]. El cambio de estado es también el responsable de que sea posible purificar el gas natural de sustancias como el azufre, aumentando así la proporción del metano, llegando a alcanzar proporciones del 98% [2], y por lo tanto aumentando el poder calorífico del combustible. Es común retirar también los compuestos más pesados como el etano (C_2H_6) para comercializarlos más tarde. Esta solución es la adecuada para motores de mayor tamaño, es recurrente su uso en el sector marítimo.

En estado gaseoso es el GNC, una de las soluciones en las que se centra este trabajo. Para almacenar el gas natural en estado gaseoso la solución adoptada es introducirlo en unos depósitos a una presión de 250 bar [2]. Esta solución admite también la purificación del gas, para obtener mayor porcentaje de metano. El GNC se usa en motores de tamaño mediano y pequeño, por lo que para la movilidad interurbana es el adecuado y el más usado. El Grupo Volkswagen es el que está apostando por GNC, implantándolo en sus diferentes marcas.

Un ejemplo del uso de GNC en el sector de la movilidad es la EMT en Madrid, que en 2016 poseía 800 autobuses [2] que circulaban con GNC. El uso de GNC ha supuesto un ahorro de 1.020.000 € [2] además de una reducción de contaminación acústica. Otro parte del sector que se ve claramente favorecido por el uso del GNC es el del taxi.

Cabe destacar, por último, el sistema de recogida de basura de Madrid que funciona con GNC generado a base de los residuos orgánicos, de manera que el ciclo es completamente limpio. El proceso que lleva a cabo es: se recoge la basura y la lleva a la planta de tratamiento de residuos, donde gracias a la fermentación consiguen extraer el biogás¹, que

¹ Biogás: es un gas combustible generado a través de procesos de degradación de materia orgánica por parte de microorganismos que actúan en ausencia de oxígeno.

se comprime para luego rellenar los tanques de los camiones que van a recoger los residuos.

Estos ejemplos demuestran que el gas natural es un combustible que ya existe en el mercado y resulta rentable para el cliente, además de tener ventajas ecológicas, gracias a sus propiedades. Algunas de ellas, de forma más específicas, se pueden observar en la *Tabla 1*. Una de ella es el poder calorífico por unidad de masa del gas natural, que es superior al de la gasolina y el gasóleo. Aunque por unidad de volumen es inferior, y por ello es necesario comprimirlo para poder hacerlo más rentable. Para llegar a esta conclusión es necesario mirar el poder calorífico inferior ya que el agua no llega a condensar dentro de la cámara de combustión del motor, por lo que la entalpía de vaporización del agua no se aprovecha, en otros casos como en el caso de las calderas es más normal usar el superior.

Mezcla aire- combustible a 1,013 bar y 15°	Composición del combustible	Dosado estequiométrico	Peso molar	Fracción molar	Poder calorífico unidad masa de combustible	Poder calorífico inferior unidad masa y volumen en mezcla esquetiométrica	
		l/Fe (kg aire/kg comb.)	Mf (kg/kmol)	Xa (-)	Hc (MJ/kg)	EFQ (MJ/kg)	HcVme (MJ/m³)
Metano	CH ₄	17,16	16,0	0,905	50,00	2,64	3,22
Gas natural	C _{1,077} H _{4,113} + 0,01N + 0,01CO ₂	16,27	17,8	0,909	47,54	2,66	3,24
Gasolina	C ₈ H _{15,472} O _{0,168}	14,17	114,2	1,00	43,89	3,10	3,78
Gasóleo	C ₁₂ H _{23,280} O _{0,084}	14,47	168,6	1,00	42,47	2,93	3,58

Tabla 1: propiedades del Gas Natural en comparación con otros combustibles. [2]

La reducción de poder calorífico por unidad de volumen provoca que haya una pérdida de potencia, que puede ser subsanada con un cambio en el sistema de inyección que se planteará en el *Capítulo 6*. Para demostrar esta pérdida de potencia es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$N_e = i * n * V_T * \eta_v * F_r * H_{cVme} * \eta_e \text{ (KW)}$$

Ecuación 2: potencia de un motor con gas natural como combustible. [2]

En la *Ecuación 2* i son los ciclos por revolución, n es el régimen de giro (rev/s), V_T es el volumen total de la cilindrada, F_r es el dosado relativo, η_e es el rendimiento del motor, η_v es el rendimiento volumétrico y H_{cVme} es el poder calorífico inferior por unidad de

volumen. Por lo que como se ve en la *Ecuación 2* si el poder calorífico inferior es menor que el de la gasolina o el gasóleo, como se ha comentado previamente, la potencia se ve reducida.

Cabe destacar que la purificación del gas natural para que se asemeje más al metano es conveniente, ya que aumenta el poder calorífico y por lo tanto hace que la pérdida de potencia es menor.

Otra característica interesante del gas natural es el comportamiento antidetonante que tiene, debido al alto número de octanos en su composición. Como consecuencia es posible aumentar la relación de compresión (r), como se muestra en la *Tabla 2*.

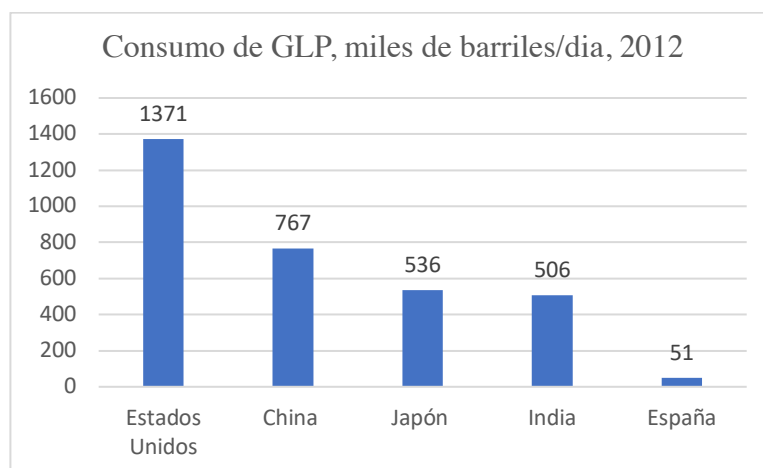
	Gas Natural	Gasolina
Aspiración natural	13,5	11
Sobrealimentado	12	9

Tabla 2: relaciones de compresión en diferentes tipos de motores. [2]

Esta mejora hace que aumente la presión máxima de combustión y el rendimiento efectivo respecto a un motor que usa gasolina.

4.2 Gas Licuado de Petróleo.

El Gas Licuado de Petróleo (GLP), también denominado Autogas, es actualmente el carburante alternativo más usado en el mundo, con más de 25 millones [3] de vehículos, de los cuales en España hay un total de 70.000 [3].



Gráfica 2: consumo de barriles/día de GLP. [6]

El GLP es la mezcla de gases condensables que provienen de la refinación del petróleo. En el pasado esta producción se destruía por venteo o mediante la quema en antorcha

perdiendo la energía que proporciona. Otro posible origen es la producción y procesado del gas natural. Es inodoro e incoloro. La composición puede variar y por lo tanto las propiedades, dicha composición tiene como elementos principales normalmente el propano (C_4H_{10}) o el butano (C_3H_8). En condiciones normales de temperatura es un gas, aunque si se somete a un descenso de temperatura o a presiones moderadas se condensa produciendo líquido, que se almacena en contenedores de acero o aluminio.

Mediante el refinado del crudo de petróleo es posible obtener GLP. El refinado es un proceso muy complejo que requiere de varias etapas (destilación atmosférica, reformado, craqueo). Atrapados en el crudo están ciertos gases, que son necesarios retirar para poder transportarlo, estos gases tras procesarlos forman el GLP.

En el proceso de refinado del crudo, los primeros productos que se desprenden del proceso de preparación de combustibles pesados son gases que también forman el GLP. Tras el refinado del crudo se obtiene entorno a un 3% [4] del total del barril en GLP, aunque este número puede aumentar hasta una 40% [4] en el caso combustibles pesados.

El uso del GLP es muy variado, se puede utilizar en la industria, en la generación de energía o también para cocinar o como combustible para la calefacción. Pero en este trabajo se centra en su uso en el sector del transporte, como carburante que genera un número menor de emisiones que los combustibles clásicos.

Como combustible podemos ver sus características en comparación con los combustibles tradicionales en la *Tabla 3*. Como pasaba con el GNC el poder calorífico inferior es menor por lo que la potencia obtenida se ve reducida, aunque respecto al gasóleo la diferencia es pequeña y por lo tanto también la pérdida de potencia.

Mezcla aire- combustible a 1,013 bar y 15°	Composición del combustible	Dosado estequiométrico	Peso molar	Fracción molar	Poder calorífico unidad masa de combustible	Poder calorífico inferior unidad masa y volumen en mezcla esquetiométrica	
		1/Fe (kg aire/kg comb.)	Mf (kg/kmol)	Xa (-)	Hc (MJ/kg)	EFQ (MJ/kg)	HcVme (MJ/m³)
GLP 30P+70B	$C_3H_9,4$	15,44	53,8	0,966	45,82	2,87	3,50
Gasolina	$C_8H_{15,472}O_{0,168}$	14,17	114,2	1,00	43,89	3,10	3,78
Gasóleo	$C_{12}H_{23,280}O_{0,084}$	14,47	168,6	1,00	42,47	2,93	3,58

Tabla 3: propiedades del GLP en comparación con otros combustibles. [2]

Como sucedía con el GNC, el GLP el número de octanos es mayor que en el caso de la gasolina, con un ratio de octanos de 104 frente a 87 [5]. Esto provoca que la pérdida de

potencia causada por el menor PCI se vea compensada, haciendo que se alcance un par motor y una potencia mayores.

5. Ventajas e inconvenientes de la conversión del vehículo a GNL/GLP.

El proceso de transformación de un vehículo que usa gasolina a GNL/GLP es una de las múltiples soluciones actuales para reducir las emisiones. Pero en el mercado hay más opciones, aunque el principal competidor del uso de GNL/GLP es la hibridación eléctrica.

En este apartado se describirán las diferentes características que hacen que el uso del combustible alternativo sea una solución mejor tanto a corto como a largo plazo frente a la hibridación eléctrica. También se expondrá los diferentes obstáculos que deberá vencer esta tecnología, ya que todavía tiene ciertas limitaciones.

5.1 Ventajas de la conversión del vehículo a GNC/GLP.

La conversión de un vehículo para usar GNC/GLP posee numerosas ventajas entre las que se destacarán en este apartado: la reducción de emisiones tanto de partículas como de ruido, coste del combustible y el bajo coste de transformación.

5.1.1 Reducción de emisiones de gas del escape.

Las emisiones del escape de un vehículo dependen de varios parámetros: composición del combustible, la relación de compresión, la temperatura y presión de la mezcla de gas con aire, etc.

En el caso de vehículos que usan GNC/GLP se producen una reducción de las emisiones frente a la gasolina y el diésel, ya que la composición de dichos combustibles posee hidrocarburos mas simples, además de no contener plomo y muy poca cantidad de azufre. Estos combustibles producen dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos compuestos (HC), óxidos de azufre ($\text{SO}_{3,4}$), igual que los motores que usan gasolina y diésel, pero en menores cantidades y a diferencia del diésel produce una cantidad casi nula de partículas contaminantes, que se generan en la combustión del gasóleo debido a la pirolisis a altas temperaturas de hidrocarburos.

En la *Tabla 4* se puede ver los diferentes valores de las emisiones de los contaminantes antes mencionados

	Gasolina	Gasóleo	GLP	GNC
EMISIONES				
NO_x (mg/km)	80	250	80	80
PM (mg/km)	0	4,5	0	0
CO₂ <i>WtW</i> (g/MJ comb)	87,1	88,6	74	72,6
CO₂ <i>TtW</i> (g/MJ comb)	73,3	73,2	66	56,1
CO y HC (mg/km)	1100	550	1100	1100

Tabla 4: emisiones por combustibles. [8]

- Emisiones de dióxido de carbono (CO₂): para el cálculo de las emisiones de CO₂ es necesario explicar tres términos:
 - *Tank to Wheel (TtW)*: son las emisiones que corresponden a la combustión de un combustible en el motor de un vehículo. Dependen de la composición del combustible, dando lugar a un factor de emisiones de eCO₂ que representa los gramos de CO₂ en cada gramo de combustible quemado.
 - *Well to tank (WtT)*: son las emisiones que tienen en cuenta el consumo de energía correspondiente a la manipulación, transporte y compresión o licuefacción de los combustibles.
 - *Well to Wheel (WtW)*: es la suma de las anteriores.

Como se puede observar en la *Tabla 4* el uso de estos combustibles conlleva una reducción del CO₂ expulsado a la atmósfera. Dicho gas es el principal causante del efecto invernadero. La reducción es de un 15% en el caso de GLP frente a la gasolina en el caso de *WtW* y de un 10% en el caso de *TtW*. En el caso de el GNC la reducción es de un 16,6% en *WtW* y de un 23,4% en *TtW*.

- Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x): estas emisiones están generadas principalmente por las temperaturas máximas y por la distribución de la temperatura en la cámara de combustión. Cuanto mayor sea la temperatura mayor será la producción de NO_x. La normativa actual de la Unión Europea, la Euro 6, trata de reducir un 60% [9] la emisión de NO_x, limitando a 0,06 g/km [9] en el caso de la gasolina y a 0,08 g/km [9] en el del gasóleo.

Con los datos en la *Tabla 4* se concluye que la gran diferencia reside entre gasóleo y el resto, produciendo el gasóleo más de tres veces la cantidad que producen el GLP, GNC y la gasolina.

- Emisiones de partículas (PM): este es un contaminante muy típico de los vehículos que circulan con diésel, se puede distinguir dos tipos:
 - PM_{2,5}: son partículas de 2,5 micras de tamaño, son gravemente perjudiciales para el ser humano. Se producen principalmente en la combustión del diésel.
 - PM₁₀: son de un tamaño de 10 micras, pueden tener un origen diferente a la combustión del diésel, como de origen natural (polvo de África).

Estas partículas están reguladas por la Euro 6, actualmente, que tratan de reducir la cantidad a 4,5 mg/km [9]. En el caso del uso de GNC o GLP la expulsión a la atmósfera de estas partículas es despreciable, se puede considerar nula.

- Emisiones de monóxido de carbono y hidrocarburos (CO y HC): en el caso de los hidrocarburos y el monóxido de carbono se puede concluir viendo la *Tabla 4* que el uso de GLP o GNC no cambia respecto al uso de gasolina. El valor es mayor respecto al uso del gasóleo como combustible.
- Emisiones de óxido de azufre (SO_{3,4}): el óxido de azufre es uno de los principales causantes de la lluvia ácida y unos de los compuestos la Unión Europea trata de reducir. El objetivo es que los vehículos, independientemente de si es de gasolina o diésel, expulsen un 95% [9] menos de azufre a la atmósfera.

La producción de GNC y GLP tienen la ventaja de que pueden ser tratados, de forma que es posible eliminar las trazas de azufre y, por lo tanto, reducir a cero las emisiones de óxidos de azufre, cumpliendo con los estándares europeos.

5.1.2 Reducción del ruido.

Una característica de los motores de combustión interna es la generación de contaminación acústica. Como muestra la *Imagen 1* un turismo genera 70 dB cuando circula de forma normal, pero cuando hay tráfico el ruido sube a 80 dB lo cual ya puede empezar a generar daños.



Imagen 4: niveles de ruido en dB según el vehículo. [10]

El uso de GNC/GLP reduce los dB como muestra la *Imagen 2*, nunca superando el límite exigido por la Unión Europea de 72 dB [11] para los coches matriculados a partir del 1 de Julio de 2016, que se verá reducido a partir del 1 de Julio de 2020 a 70 dB [11].

La *Imagen 5* muestra que el ruido depende la potencia del motor, aunque un motor de gasolina 12 kW menor que uno de gas genera una contaminación acústica similar al de gas.

Esta reducción se debe a que la intensidad de la explosión es menor por lo que se decrece las vibraciones causadas y por lo tanto el ruido generado.

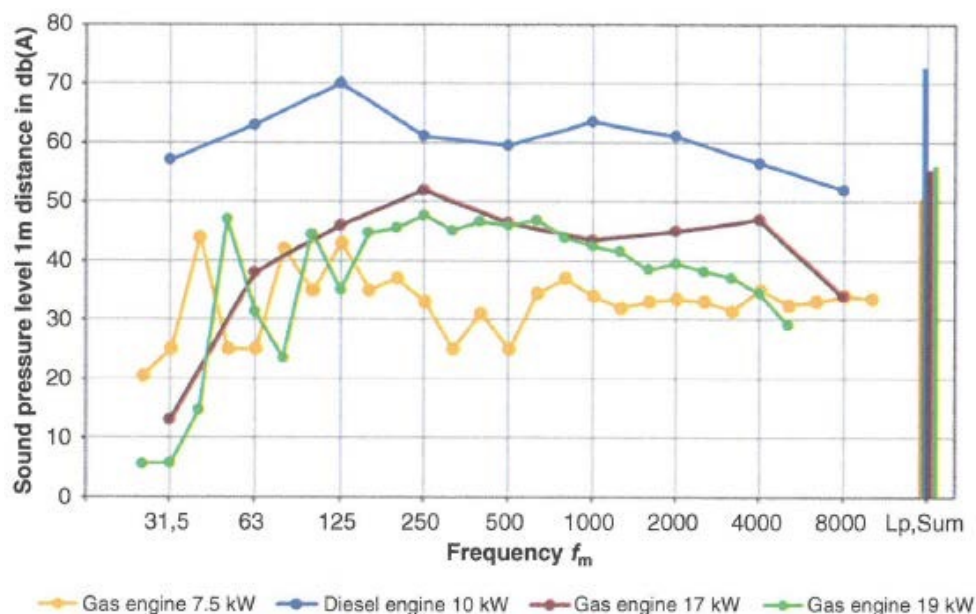


Imagen 5: ruido generado por diferentes combustibles. [12]

5.1.3 Coste del combustible.

Las ventajas del uso de GNC/GLP como combustible no son medioambientales solo sino también económicas. El uso de estos combustibles supone un ahorro sustancial respecto al uso de gasolina o gasóleo.

En la *Tabla 5* se puede ver los diferentes precios de los combustibles:

	Gasolina		Gasóleo		GLP	GNC
	95	98	A	A+		
Precio (€/L)	1,39	1,54	1,27	1,33	0,736	0,919

Tabla 5: precios de combustibles. [13] [14]

Como se puede observar la diferencia de los combustibles alternativos es sustancial con respecto a los clásicos, lo cual en si mismo, supondrá un gran ahorro si el consumo es parecido.

Un ejemplo de un vehículo en el mercado que posee la opción de adquirirlo con un motor de diésel o como de GNC es el Volkswagen Caddy. En ambos casos la potencia es parecida, con una diferencia de 6 CV, el 1.4 Bluemotion Trendline (GNC) posee 110 frente a los 104 del 1.9 TDI (diésel). La diferencia de consumo es pequeña, 7,9 [15] de GNC en un entorno urbano frente a 7,4 [16] de diésel y en entorno extraurbano el consumo es idéntico 5,4 [15].

Con esta pequeña diferencia de autonomía y la gran diferencia en precio de los combustibles se puede suponer un gran ahorro como se demuestra en el siguiente ejemplo. Suponiendo una persona que posee un trabajo a tiempo completo, con un coche de antigüedad máxima de 4 años en España recorrería una media de 14.591 km al año [17]. Si utilizase el Volkswagen Caddy anteriormente descrito se ahorraría:

$$gasto\ anual\ en\ combustible\ (€) = \left(\frac{kilómetros}{100} \right) * consumo * precio$$

Ecuación 3: gasto anual en combustible.

- En el caso del GNC el gasto en un año sería: 1059,32 €
- En el caso del diésel el gasto en un año sería: 1371,26 €

El ahorro total en un año será de 311 € en el caso de usar el GNC frente al diésel. Suponiendo esto una ventaja de los combustibles alternativos a los clásicos. En el caso del GLP el ahorro es de 521 €, suponiendo un consumo similar.

5.1.4 Coste de transformación.

Otra ventaja económica del uso del GNC/GLP es que se puede usar transformando el vehículo. Haciendo ciertos cambios en el coche, como la introducción de unos tanques para almacenar el gas, válvulas de repostaje y de seguridad. Además, puede ser necesario que haya que cambiar el sistema de inyección para afinar el proceso de combustión. Todo esto se describirá y se estudiará en detalle en el *Capítulo 7 y 8*.

Estos cambios suponen un gasto mucho menor que el cambio de vehículo, que sería la solución más normal, con una hibridación eléctrica. Una transformación de un vehículo en circulación de 4 cilindros a GLP puede salir por un precio de 1550 € [18], aumentando hasta 1850 € [18] en el caso de tener 8 cilindros.

Aunque el precio de la transformación de un vehículo a GNC/GLP puede variar, siempre va a ser más barato que cambiar de vehículo como sería necesario en el caso de la hibridación eléctrica.

5.2 Inconvenientes de la transformación del vehículo a GNC/GLP.

Los vehículos que usan GNC y GLP deben todavía superar ciertos obstáculos para poder llegar a ser la solución óptima. Las principales desventajas de estos carburantes son: los escasos puntos de repostaje, efectos secundarios de la transformación y posibles pérdidas de potencia debido al uso del combustible alternativo.

5.2.1 Escasos puntos de repostaje.

Para el desarrollo de la tecnología del GNC/GLP es necesario una red de puntos de repostaje suficientemente amplia para que sea posible realizar cualquier trayecto por la península sin tener un problema de autonomía.

Actualmente España posee un total de 659 [3] de estaciones de repostaje de GLP y de GNC, el número es más reducido, con un total de 33 [19] de estaciones de uso exclusivo de GNC, además, se están construyendo 16 [19] nuevas estaciones. De uso compartido entre GNC y GNL (gas natural licuado) hay otras 33 y 27 [19] en construcción.

La diferencia en número de estaciones es posible que sea causada por la preferencia de los fabricantes en usar GLP frente a GNC, siendo el Grupo Volkswagen el único que apuesta claramente por el uso de GNC. Es por eso, que empresas como Repsol, Cepsa... han apostado por instalar en sus estaciones puntos de repostaje de GLP.

El bajo número de estaciones de GNC se debe entre otras cosas a lo complicado que es manejarlo, ya que requiere condiciones muy específicas, 250 bar, que necesitan de unos sistemas complejos de compresión que eleva la presión del gas que recibe la estación hasta alcanzar la requerida. Para ello utiliza un conjunto de compresores, accionamientos y sistemas de refrigeración para que el proceso sea lo más seguro y eficiente posible. A todo esto, hay que añadirle sistemas de almacenamientos específicos para el GNC, además de los surtidores específicos. Todo esto hace que la instalación de puestos de repostaje de GNC en las estaciones ya existentes sea complicada o en algunos casos imposibles y sea necesario construir nuevas estaciones, con los costes y el tiempo que eso conlleva, haciendo que sea más lento su desarrollo. Pero la Comisión Europea en la Directiva 2014/94/UE exige que se garantice la existencia de una estación de GNC cada 150 km



Imagen 6: estaciones de Gas Natural. [19]

Mientras tanto GLP no requiere de unas condiciones muy diferente a la de la gasolina o el gasóleo y por lo tanto es muy fácil de instalar en las estaciones ya existentes.

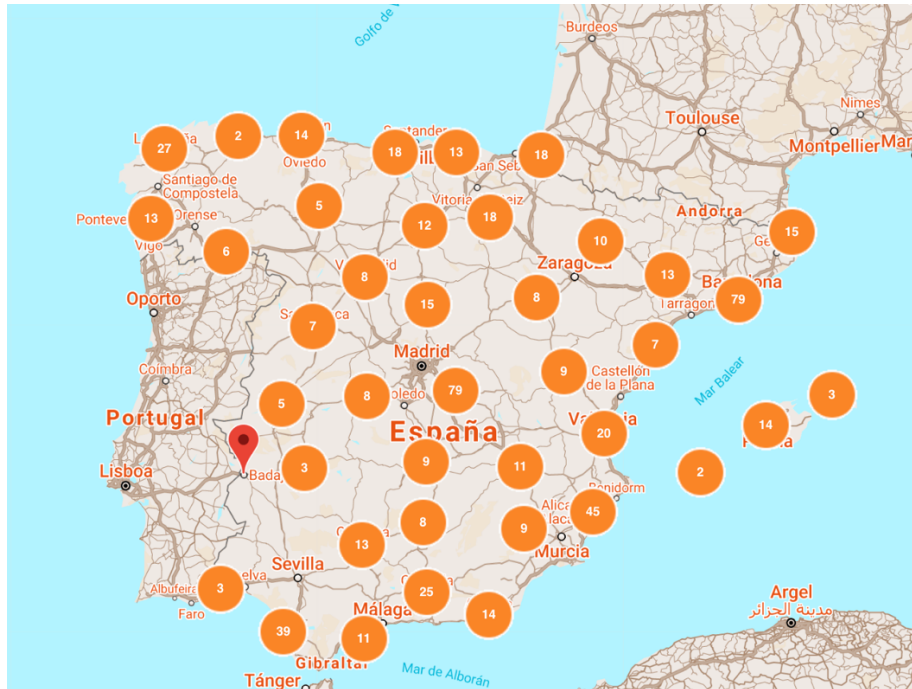


Imagen 7: estaciones de GLP. [3]

El número de estaciones de GLP/GNC parece insignificante en comparación con el número de estaciones de gasolina y gasóleo, que asciende en España a un total de 11.609 [20], y es por eso por lo que para que la implantación de la tecnología de estos combustibles alternativos sea una opción real de futuro, es necesario aumentar el número de estaciones.

5.2.2 Efectos secundarios de la transformación.

La transformación de un vehículo al uso de GNC/GLP requiere, como se ha explicado anteriormente, de cambios físicos cuyo principal inconveniente es la reducción de espacio de maletero.

La reducción del maletero esta causada por la introducción de tanques que sirven para almacenar el gas. Dichos tanques deben que tener ciertas propiedades especiales que hacen que sean capaces de soportar presiones de hasta 200 bar en el caso del GNC, mientras que el GLP no requiere esas presiones.

Además, para mantener la autonomía es necesario que el vehículo tenga una capacidad de admitir más volumen de gas que lo que tenía previamente de gasolina con el consiguiente impacto en la reducción del maletero.



Imagen 8: tanque de almacenamiento de un vehículo con GNC. [2]

En el caso de que el vehículo haya sido diseñado originalmente para que use un combustible gaseoso la disposición de los tanques de almacenamiento se sitúan bajo el suelo y de esta forma se puede salvar espacio en el maletero. Si se desea realizar este proceso a un vehículo que originalmente era de gasolina se requerirá hacer cambios en el chasis que elevarán considerablemente el gasto de la transformación, haciéndola menos rentable.

5.2.3 Pérdida de potencia debido al nuevo combustible.

Unos de los requisitos necesarios para que los combustibles alternativos consigan hacerse un hueco en el sector de la movilidad es que, tanto el rendimiento como la autonomía sean similares al de un vehículo de gasolina o diésel. La autonomía no supone un problema ya que es posible aumentar el número de tanques para incrementar la capacidad de almacenaje. En cambio, el rendimiento del motor se ve afectado con el cambio de combustible.

Debido a las propiedades del GNC/GLP se produce una reducción de la potencia del motor. Como se muestra en la *Ecuación 2*, en la que se describe como se calcula la potencia de un motor, que depende del poder calorífico. Es por ello el menor poder calorífico inferior del GNC y el GLP provoca una menor potencia, cuando se trabaja en las mismas condiciones respecto a la gasolina. En la *Ecuación 4* podemos determinar el porcentaje de potencia que se pierde en comparación con la gasolina:

$$\frac{N_{GNC/GLP}}{N_{gasolina}} = \frac{\eta_{e\ GNC/GLP}}{\eta_{e\ gasolina}} * \frac{F_{r\ GNC/GLP}}{F_{r\ gasolina}} * \frac{H_{cvme\ GNC/GLP}}{H_{cvme\ gasolina}}$$

Ecuación 4: relación de potencia entre gasolina y GNC/GLP. [2]

Para conocer la pérdida de potencia primero hay que explicar ciertos términos de esta ecuación. El término Fr se refiere al dosado relativo. El dosado es la relación entre la cantidad de combustible y la cantidad de aire que entran en el motor. La mezcla, de combustible y aire puede ser de dos tipos principalmente:

- Mezcla estequiométrica: no existe ni exceso ni defecto de aire en la combustión y depende principalmente de la composición del combustible. Este tipo de mezcla es típico de los vehículos con gasolina.
- Mezcla pobre: existe un exceso de aire. Los valores normales en caso de este tipo de mezcla son entre 0,6 y 0,7. Los motores que funcionan con GNC y GLP pueden usar este tipo de mezcla.

El uso de una mezcla pobre provoca una pérdida de potencia, debido al menor uso de combustible que es el que aporta el mayor poder calorífico y por lo tanto la explosión que se produce en la combustión es menor. Por eso es deseable mantener el dosado relativo con el mismo valor que la gasolina.

Otro término que hay que explicar de la ecuación es η_e , que se define como el rendimiento efectivo, siendo el producto del rendimiento mecánico y el rendimiento indicado. En el caso del GN el rendimiento efectivo es del 27% [2] y de la gasolina de un 25% [2]. Por lo tanto, en el caso del GNC, suponiendo un dosado estequiométrico de 1, la pérdida de potencia es:

$$\frac{N_{GNC}}{N_{gasolina}} = \frac{0,27}{0,25} * \frac{1,0}{1,0} * \frac{3,241}{3,780} = 0,93$$

Ecuación 5: relación de potencia de GNC y gasolina.

Por lo tanto, la pérdida de potencia en el caso del GNC es de un 7%. Esto sucede, aunque se haya incrementado la relación de compresión o la presión de sobrealimentación, pero si se lleva a cabo una inyección directa del gas en el pistón entonces la reducción de potencia es nula.

6. Funcionamiento del motor de un vehículo con GNC/GLP.

El cambio de combustible conlleva que se produzcan cambios en la combustión y para que el motor mantenga el mismo rendimiento será necesario que se produzcan cambios en el proceso de combustión o en la mezcla. Por lo tanto, en este apartado se estudiará los diferentes cambios que se le pueden realizar al ciclo Otto, en el que se basa. Además, se concluirá que tipos de inyecciones que se pueden utilizar y cual es preferible.

6.1 Ciclo Otto.

El ciclo Otto es un proceso de combustión que se produce con encendido provocado. Se caracteriza porque comprime la mezcla de aire y combustible y la hace explotar mediante una chista, que es proporcionada por la bujía. Se ha de conseguir una mezcla homogénea por toda la cámara y que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad. La mezcla ha de realizarse pronto en el ciclo, se suele llevar a cabo durante la carrera de admisión y una condición importante es que dicha mezcla no se auto encienda durante la compresión, para ello es necesario limitar la temperatura de admisión. Para conseguir la mezcla homogénea es necesario normalmente estrangular el flujo en el conducto de admisión para controlar tanto la cantidad de combustible como de aire. Estos motores también se caracterizan por tener una relación de compresión de entre 9:1 a 11:1.

Esta clase de motores puede ser de dos tipos: dos tiempos o cuatro tiempos. El motor de dos tiempos requiere de una vuelta completa al cigüeñal para completar todo el proceso, mientras el cuatro tiempos requiere de dos vueltas completas al cigüeñal.

Para estudiar más en detalle este tipo de ciclo es necesario verlo desde un punto termodinámico. En la *Imagen 9* se ve el desarrollo de la presión en función del volumen específico. En este caso se trata de un motor con una relación de compresión 10:1, que tiene un α de 6,12, que especifica el calor aportado por unidad de masa de mezcla, y una β de 1, un valor constante en todos los ciclos Otto.

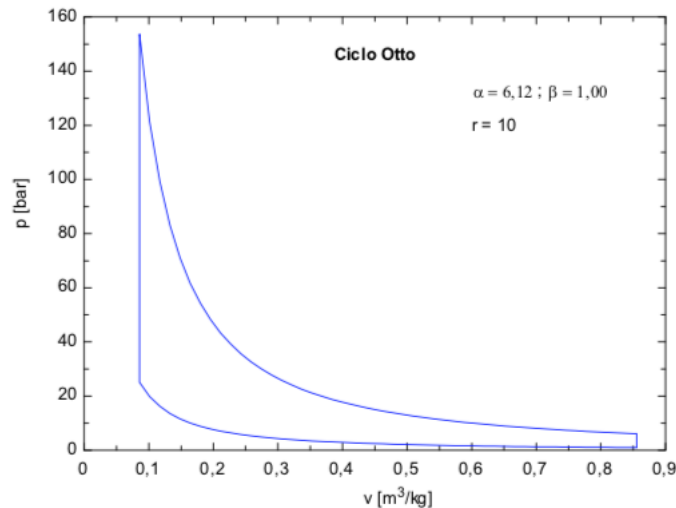


Imagen 9: ciclo termodinámico de Otto. [25]

En la *Imagen 9* se puede observar como funciona el ciclo Otto. El proceso empieza con la introducción de la mezcla, aumentando la presión según el pistón asciende. La siguiente parte del ciclo es el chispazo de la bujía que produce la explosión, haciendo que aumente la presión y, por lo tanto, haciendo descender el pistón, aumentando el volumen específico. Una vez está descendiendo el pistón se abre la válvula de escape para expulsar todos los gases, una vez se expulsa los gases y se cierra la válvula vuelve a empezar.

Otra forma de describir un motor es mediante curvas de carga, como la *Imagen 10*, en la cual podemos observar el par y la potencia en función de las revoluciones. Estas curvas son muy interesantes para comprender que requisitos debe cumplir el motor cuando se transforme, potencia máxima y par máximo.

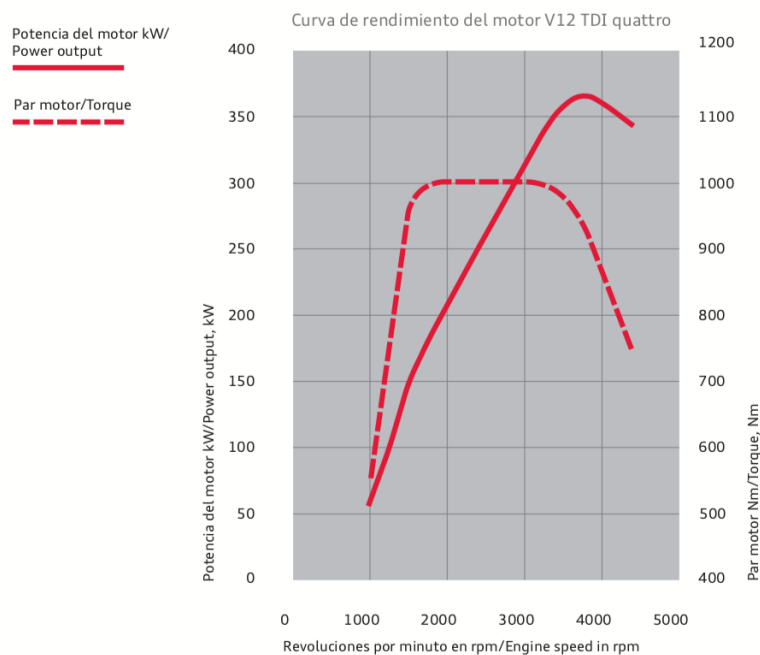


Imagen 10: curvas de carga de un Audi Q7 V12 2015. [26]

6.2 Ciclos alternativos para mejorar el rendimiento.

Como se ha explicado anteriormente, en este proyecto se transformará un motor de ciclo Otto y para que el rendimiento obtenido por el motor sea el deseable habrá que hacer cambios en el mismo. Estos cambios resultarán de dos tipos de ciclos: ciclo Miller y ciclo Atkinson y Lenoir, una variación de Atkinson.

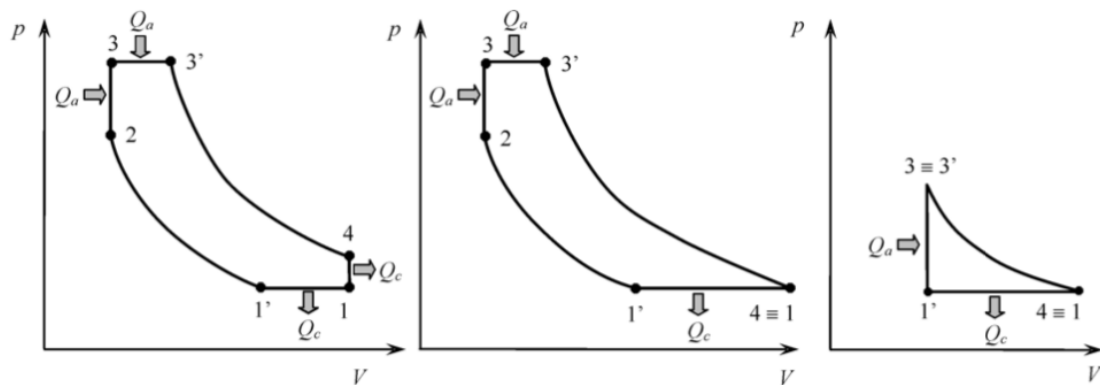


Imagen 11: diagramas de p-V de ciclos termodinámicos de Miller, Atkinson y Lenoir. [27]

6.2.1 Ciclo Miller.

El ciclo de Miller se diferencia del ciclo Otto en que el cierre de admisión se adelanta. Cerrando la válvula de admisión durante el descenso del pistón conseguimos que la mezcla se expanda por el cilindro y por lo tanto la presión se rebaje. El pistón baja hasta el PMI² y sube alcanzando la presión requerida. Esto hace que no haya necesidad de bombeo ya que no hay reflujo y por lo tanto no se pierde potencia.

El problema del ciclo Miller es que al final de la carrera de admisión la presión es baja, aunque el uso de la sobrealimentación puede solucionarlo. Otra solución es el uso de un *intercooler* para aumentar la cantidad de masa reduciendo la temperatura.

En cuanto al ciclo Miller desde un punto de vista termodinámico, se puede observar en la *Imagen 11*, que el punto 1' está más cercano a 1 porque se ha cerrado la admisión antes, aunque el punto 2, el final de la compresión es el mismo que en Atkinson. Este cambio en el punto de cierre de admisión afecta con al rendimiento como se ve en la *Imagen 12*, en la que observa como afecta también la relación de compresión.

² PMI: punto medio inferior, el punto mas cercano al cigüeñal que alcanza el pistón en su movimiento en el cilindro.

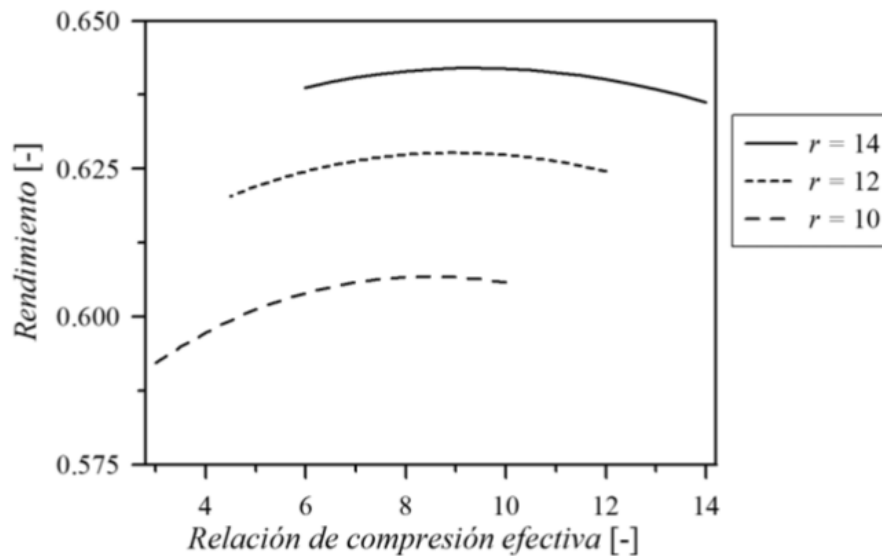


Imagen 12: evolución del rendimiento del ciclo Miller con presión limitada a 90 bar en función de la relación de compresión relativa (r_e) en para distintos r . [27]

Se puede observar que un aumento de la relación de compresión conlleva un aumento del rendimiento, pero un aumento de la relación de compresión efectiva no siempre conlleva un aumento del rendimiento, especialmente en el caso de relaciones de compresión altas. En relaciones de compresiones altas la variación del efectivo afecta poco, ya que apenas sufre variaciones con el cambio de r_e .

Utilizando el valor de 12 de la relación de compresión de la *Imagen 12* se saca un diagrama p - V , *Imagen 13*, para los diferentes valores de la relación de compresión efectiva.

En la *Imagen 13* se observa que cuando disminuye r_e el trabajo de compresión decrece, esto hace que aumente el área encerrada y se parezca más a un ciclo de combustión de volumen constante. En cambio, en el proceso de expansión el trabajo disminuye ya que el calor aportado a presión constante es menor. Por lo tanto, el trabajo en el ciclo es prácticamente constante.

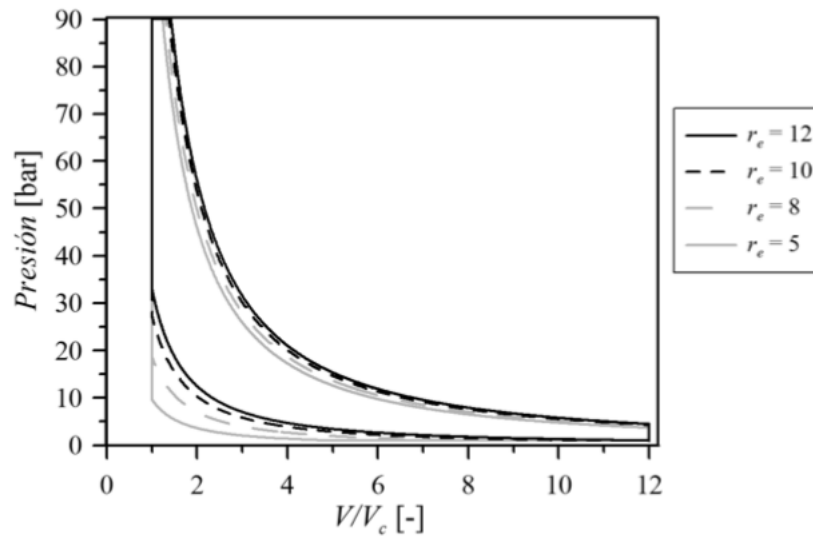


Imagen 13: diagrama p-V de un ciclo Miller con presión máxima 11 y relación de compresión constante ($r=12$). [27]

6.2.2 Ciclo Atkinson.

El ciclo Atkinson es similar al Miller, pero en vez de adelantar el cierre de la admisión se retrasa. El peligro de autoinflamación está presente en el ciclo Otto cuando se eleva la relación de compresión, pero como en la carrera de compresión es menor en el caso, la posibilidad de que suceda es menor. La relación de compresión efectiva en este caso no es entre PMI y PMS³, sino entre el cierre de admisión y PMS. En cambio, la carrera de expansión es la misma que en Otto, entre PMI y PMS, y, por lo tanto, se obtiene más trabajo y más rendimiento efectivo.

Existe cierto reflujo hacia la admisión de la mezcla y cuando se cierra la admisión la cantidad de masa es menor y por lo tanto la potencia suministrada por el motor es menor. En este caso, como en el caso del ciclo Miller no se producen pérdidas por bombeo.

Desde un punto de vista termodinámico el ciclo de Atkinson se puede observar en la *Imagen 11* que la distancia entre 1 y 1' es mayor que en el caso del ciclo Miller. En el caso de comparar este ciclo con uno de presión limitada se puede observar, en la *Imagen 14*, que el rendimiento es claramente mejor, suponiendo las mismas características, es decir, misma presión máxima y mismo calor aportado por unidad de masa.

³ PMS: punto medio superior, es el punto más cercano a la culata que alcanza el pistón en su movimiento en el cilindro.

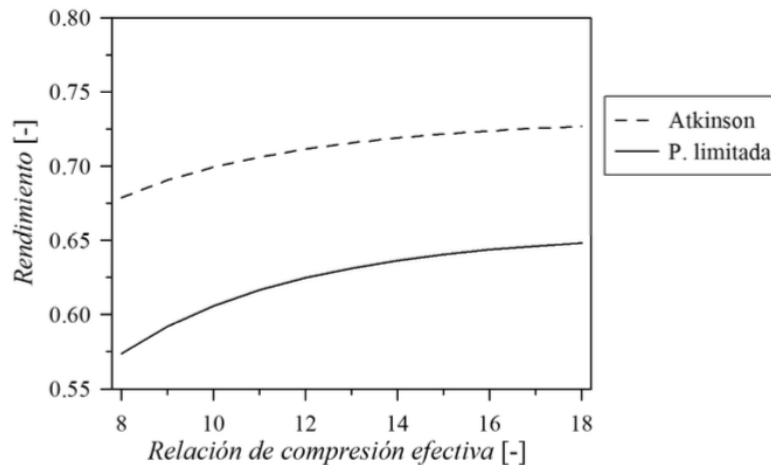


Imagen 14: rendimiento de los ciclos con presión máxima 90 bar en función de la relación de compresión relativa. [27]

En el diagrama p-V, la *Imagen 15*, podemos observar como el área que encierra la curva en el caso del ciclo Atkinson es mayor que la del ciclo de presión limitado, esto supone ciertas ganancias termodinámicas, aunque, implementar este ciclo tiene ciertas complicaciones mecánicas.

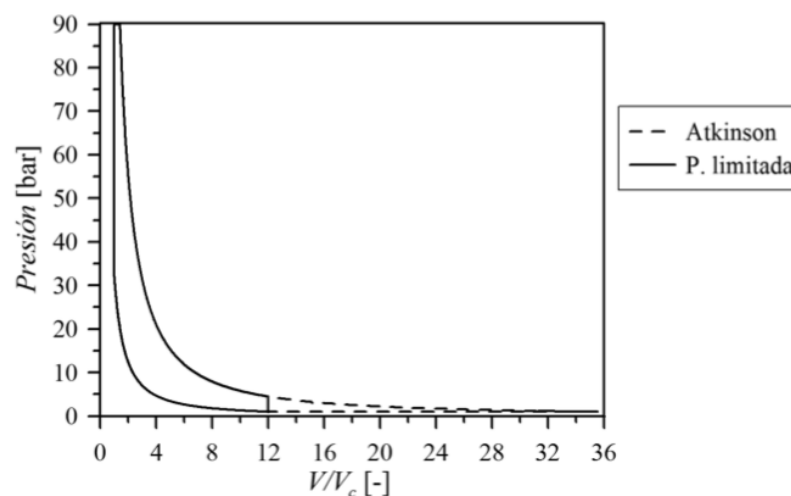


Imagen 15: diagrama p-V del ciclo Atkinson, con relación de compresión $r=12$ y presión máxima 90 bar. [27]

Existe también una variación al ciclo Atkinson llamada ciclo Lenoir. En esta clase de ciclo la combustión se realiza sin compresión previa. La expansión se produce de forma completa. Se puede suponer que es una combustión a $V=\text{cte}$. Esta clase de ciclo tiene un rendimiento claramente inferior comparado con los ciclos que comprimen la mezcla antes de la combustión.

6.3 Distintos tipos de inyección.

Para el correcto funcionamiento de un motor es necesario optimizar la forma en la que el combustible es introducido en la cámara de combustión. Por lo tanto es necesario ver si los sistemas tradicionales de inyección, directa e indirecta, se pueden utilizar con los nuevos combustibles, GNC y GLP.

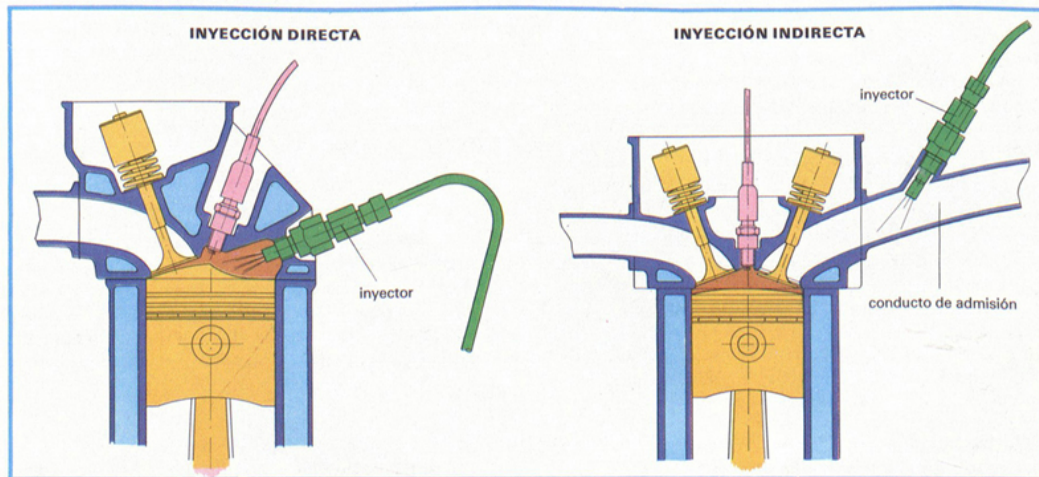


Imagen 16: sistemas de inyección. [28]

6.3.1 Inyección directa.

Este sistema inyecta el combustible directamente a la cámara de combustión. Mediante esta solución se consigue cambiar la distribución de la mezcla aire-combustible dependiendo de si el motor está trabajando a carga plena o a carga parcial.

A plena carga el combustible es inyectado durante la fase de admisión, de esta forma se consigue que la mezcla sea homogénea en la cámara de combustión. De esta forma se obtiene un resultado similar al de la inyección indirecta.

En el caso de carga parcial, la mezcla es estratificada. En la zona más cercana a la bujía la cantidad de combustible es mayor y va decreciendo según se aleja, llegando a ser el dosado nulo. Para conseguir esta distribución es necesario introducir el combustible durante la compresión, además, es necesario tener en cuenta ciertos factores como la forma de la cámara, la posición del inyector y el inicio y la duración de la admisión.

Como consecuencia de la variación del combustible en función de la carga podemos obtener un gran rango de valores del dosado, que van desde $1/12,5$ [27] a plena carga a $1/50$ [27] en carga parcial en el caso de la gasolina. Para conseguir estas variaciones es

necesario controlar del combustible inyectado a la vez que añadir una válvula de estrangulación.

Desde un punto de vista del diseño de la cámara de combustión, se suele colocar el inyector en el centro de la de cámara, con múltiples orificios. Para conseguir una correcta atomización del combustible es necesario que la presión de inyección sea elevada.

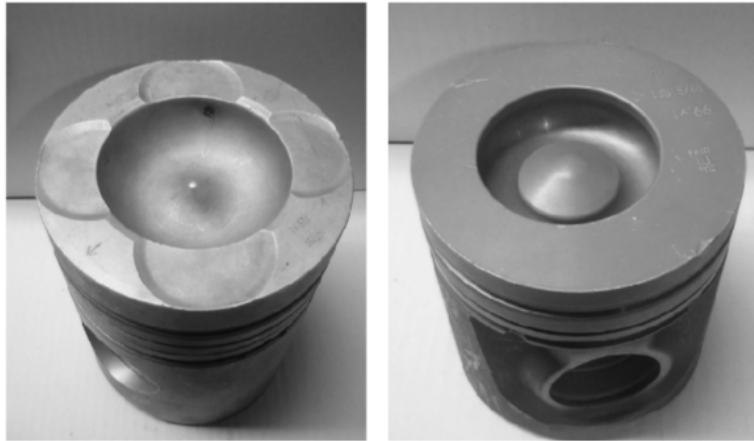


Imagen 17: diferentes émbolos de motores con inyección directa. [27]

En cuanto la adaptación de este sistema al uso de GLP/GNC es necesario realizar ciertos cambios. Debido a la alta presión a la que se introduce el combustible la temperatura del inyector se incrementa pero la gasolina es capaz de refrigerarlo con el paso, pero en cambio el gas como combustible es incapaz por lo que es necesario añadir un anillo de teflón, que es un gran conductor térmico, al inyector para bajar el la temperatura o otra opción es añadir otros inyectores para el gas que hagan que la temperatura de la combustión no sea tan alta, aunque esto conlleva una pérdida de prestaciones del motor.

Debido a la complejidad que supone conseguir que el rendimiento de este sistema de inyección sea el óptimo es normal que los talleres que transforman vehículos para que usen GNC/GLP se muestren más reticentes que en el caso de la inyección indirecta.

6.3.2 Inyección indirecta.

La inyección indirecta es otra de las soluciones para la inyección de la mezcla en el caso de los motores de combustión por encendido provocado. En este caso la mezcla se distribuye de forma homogénea por toda la cámara de combustión y el dosado debe mantenerse lo más constante posible, se admite un pequeño rango de variación en torno al dosado estequiométrico.

Para modificar la potencia del motor es necesario variar en la misma cantidad la masa aire admitida y el combustible inyectado. Para ello hay que introducir una válvula de estrangulamiento en el colector de admisión, modificando la densidad de la masa admitida y la presión de admisión. Es técnica se denomina regulación cuantitativa y modifica la masa admitida pero no el dosado.

Hay que destacar que cuanto más tarde se cierre la válvula más trabajo tendrá que realizar el émbolo para que la mezcla entre en la cámara de combustión, por lo tanto, el reducir la cantidad la carga del motor conlleva un empeoramiento del rendimiento.

Desde un punto de vista del diseño del sistema de inyección indirecta tiene que existir un lugar antes de la cámara de combustión en el que se produzca la mezcla. Se puede añadir una precámara en la que se inyecte en combustible, otra solución es situar el inyector en el conducto de admisión, así cuando se abre la válvula de admisión se introduce una mezcla ya homogénea.

En cuanto al uso de GNC/GLP con este sistema es altamente recomendable, ya que produce una mejor mezcla del gas con el aire. Es un sistema que posee además la mejor relación coste beneficio y por lo tanto es la más usada en el caso de adaptación de vehículos.

Este sistema tiene también la opción de que la inyección del gas sea única o multipunto obteniendo de esta manera un mejor rendimiento del sistema.

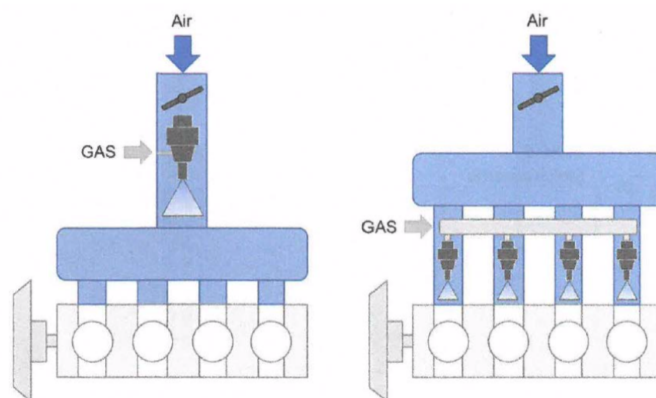


Imagen 18: sistema de inyección central (izquierda) y sistema de inyección multipunto (derecha). [12]

6.4 Tratamiento de gases de escape.

Una vez realizado todo el proceso de combustión los gases salen del motor y se dirigen al escape. Actualmente es muy normal que los vehículos posean sistemas para tratar los gases en el escape. Estos sistemas tratan de reducir las emisiones mediante reacciones

químicas principalmente. Los sistemas mas comunes son: catalizador de tres vías y recirculación de los gases de escape (EGR).

El sistema de recirculación de los gases de escape tiene como objetivo reducir las emisiones de NO_x . Funciona recirculando una pequeña cantidad de los gases hacia la cámara de combustión para ser mezclados con la carga de aire/combustible. De esta forma la temperatura de la cámara de combustión se reduce y por lo tanto baja las emisiones de NO_x . Este sistema solo funciona cuando el motor esta caliente y estabilizado y tiene la desventaja de que aumentan las emisiones de partículas por eso es necesario realizar una compensación. Como se ha explicado anteriormente los combustibles gaseosos no generan gran cantidad de partículas por lo que es interesante el uso de este sistema en el caso de mezclas estequiométricas en las que la cantidad de NO_x es superior a lo estipulado por la norma Euro V.

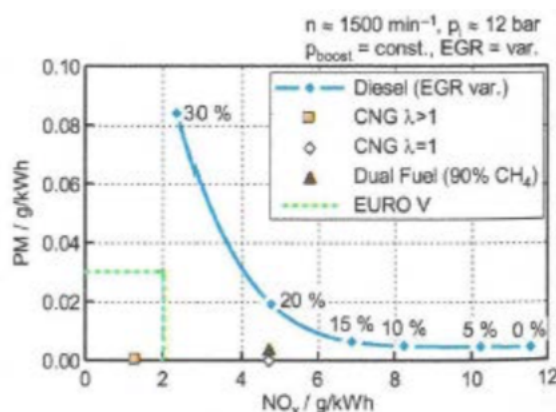


Imagen 19: relación entre NO_x y partículas. [12]

El uso de este sistema es más normal en el caso del GNC, pero no tanto en el caso del GLP, debido a las temperaturas de combustión y a la composición de dichos combustibles.

El otro sistema, el catalizador de tres vías, tiene como función reducir también el NO_x y en compuestos como CO y HC, que no han llegado a oxidar durante la combustión. Para reducir NO_x a nitrógeno N_2 utiliza los otros compuestos, CO y HC, formando CO_2 . Para conseguir dicha transformación el motor ha de trabajar utilizando una mezcla estequiométrica.

Estos catalizadores requieren de una mayor temperatura en el caso del gas natural que en el de la gasolina, pero esto supone un problema ya que la temperatura de escape es menor en el caso del gas natural, por lo que hacer una plena conversión del metano es complicado y requerirá de soluciones más complejas.

Por lo tanto, el uso de sistemas que traten los gases de escape es complejo y el resultado que se obtiene no dista mucho de cuando no se usa, ya que estos combustibles producen una combustión más limpia, por lo que en caso de no tenerlo el vehículo no sería necesario añadirlo.

6.5 Sistema bi-fuel.

El sistema bi-fuel es la solución más común cuando se adapta un vehículo para que use GNC/GLP. Este sistema existe la posibilidad de utilizar tanto gasolina como GNC/GLP. Por lo que cuando existe todavía combustible gaseoso en el tanque es posible que el vehículo funcione 100% con ese combustible.

Para funcionar como bi-fuel es necesario que el motor se base en un ciclo Otto y para el sistema de inyección lo mas normal es que tenga distintos inyectores para los dos combustibles. Para la gasolina se utiliza un sistema de inyección directa, ya que es un sistema más eficiente y no sufre de sobrecalentamiento cuando usa un combustible líquido. Para el GNC/GLP lo más común es usar un sistema de inyección indirecta en el conducto de admisión, esto es debido a que de esta manera se evita el sobrecalentamiento y desgaste de los inyectores, a parte se consigue una mezcla más homogénea para una correcta combustión.

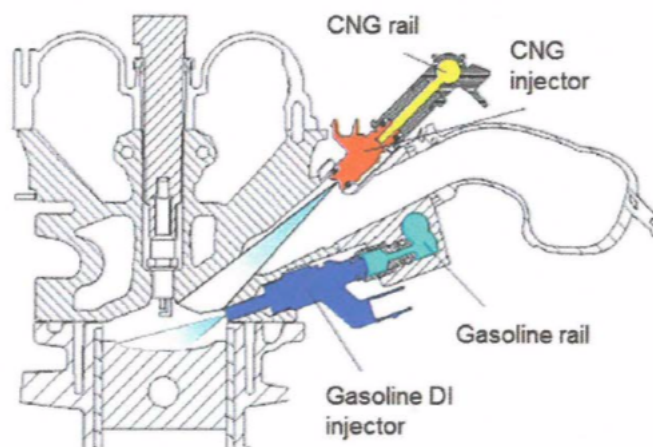


Imagen 20: sistema de inyección de un vehículo bi-fuel de GNC. [12]

Este sistema presenta grandes ventajas como la de una gran autonomía, ya que cuando se acabe el GNC/GLP puede funcionar con el tanque de gasolina, que se ve puede ver reducido con la transformación. Además, como se ha explicado en el *Apartado 5.1.1* se produce una reducción de emisiones considerables por el uso del combustible gaseoso y una reducción de coste en el combustible (*Apartado 5.1.3*).

Este sistema tiene una limitación principal y es que el arranque del vehículo se suele hacer con gasolina. Esto se debe a la mejor capacidad de inflamación de la gasolina frente al combustible gaseoso y por lo tanto resulta más fácil arrancar el vehículo cuando este frío y situarlo en unas condiciones óptimas para el uso de GNC/GLP.

Los fabricantes que producen vehículos con este sistema, principalmente el Grupo Volkswagen, añaden al vehículo la opción de usar cualquiera de los dos combustibles cuando el conductor así lo desea, no solo únicamente cuando uno de los combustibles se agota.

7. Componentes afectados.

Una vez estudiado como ha de funcionar el motor y los requisitos de los nuevos combustibles es necesario ver que componentes del vehículo es necesario modificar para satisfacer todos los requisitos. Además, habrá que tener en cuenta que sistemas habrá que añadir al vehículo para hacerlo completamente seguro. Debido a las diferentes características de los dos combustibles, requiriendo distintos requisitos de presión y temperatura, es necesario estudiarlos por separado.

7.1 Vehículos transformados a GNC.

A continuación, se detallará los diferentes componentes que hay que incluir en el vehículo para que use GNC como combustible principal. Dichos componentes han de cumplir siempre las condiciones impuestas por el reglamento 67R00, que es el reglamento nº 115 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. Otro reglamento que ha de cumplir es el nº 110 de la CEPE, que asegura las condiciones de funcionamiento de las instalaciones.



Imagen 21: nuevos componentes del vehículo para el uso de GNC. [12]

7.1.1 Depósito de GNC.

El GNC requiere una presión de 250 bar [2], para mantenerse en estado gaseoso a temperatura ambiente y por lo tanto el depósito debe que tener la capacidad de soportar dicha presión.

Para cumplir con dicho requisito se suele utilizar acero o aluminio como materiales. En el caso del acero han de satisfacer unas propiedades de resistencia a la tracción que variará

en función de los componentes como se observa en la *Tabla 6*, resistencia al impacto y flexión. El alargamiento mínimo será del 14% [29]

Resistencia a la tracción	< 950 MPa	≥ 950 MPa
Azufre	0,020 %	0,010 %
Fósforo	0,020%	0,020%
Azufre y fósforo	0,030%	0,025%

Tabla 6: valor de la resistencia a la tracción en función del valor límite de los componentes de los aceros. [29]

En el caso del aluminio, su composición no debe de tener más de 0,003 % [29] de impurezas de plomo o bismuto. Su alargamiento mínimo debe de ser de un 12% [29]. A parte habrá que controlar las posibles grietas por corrosión y el proceso de creación de dichas grietas bajo carga permanentes.

La forma de tanque es un cilindro con extremos semiesféricos, para evitar acumulaciones de tensiones no se utilizan soldaduras, ya que los puntos de acumulaciones de tensiones suelen ser donde se producen las grietas que acaban por provocar la fractura del tanque.

La vida útil de los tanques no puede superar los 20 años [29], en esos años se espera en torno a 15.000 [29] llenados. En el caso de que el tanque sea metálico la vida útil se determinará en función de la velocidad de crecimiento de las grietas por fatiga, será necesario para ello hacer una inspección ultrasónica o un ensayo similar para comprobar que no hay ninguna grieta de tamaño crítico. Estos ensayos han de realizarse cada 4 años [29]. También será necesario la inspección en caso de estar involucrada en una colisión.

A parte de estos requisitos es necesario que los tanques sean capaces de soportar los rangos de temperaturas mostrados en la *Tabla 7*:

	Máxima	Mínima
Temperatura estabilizada del gas (°C)	65	-40
Temperatura de las botellas (°C)	82	-40

Tabla 7: rango de temperaturas que soportan los depósitos de GNC. [29]

A parte de las temperaturas será necesario controlar las presiones. El tanque ha de ser capaz de soportar las siguientes presiones máximas:

- Una presión de 200 bar cuando la temperatura se hay estabilizado a 15 °C.
- 260 bar inmediatamente después del llenado, independientemente de la temperatura.

Siendo el tanque capaz de soportar todos los requisitos anteriormente mencionados habrá que estudiar cual es su comportamiento en el caso de que haya una colisión o en el caso de aparición de grietas por fatiga. En el caso de que el depósito sea metálico la presión de rotura mínima ha de ser de 40 MPa [29]. Además, estos tanques están diseñados para que haya fuga antes de rotura, en el caso de que sea por fatiga, dicha fatiga no puede aparecer antes de los 15.000 [29] ciclos.



Imagen 22: Audi A4 Avant g-tron. [30]

En la *Imagen 22* se puede observar la disposición de los tanques en un vehículo diseñado originalmente para funcionar con GNC, el caso de ser una transformación lo más habitual es situarlo en el maletero.

7.1.2 Tuberías de GNC.

Como ya se ha comentado previamente el GNC requiere altas presiones para ocupar el mínimo espacio posible, por lo tanto, para su transporte a altas presiones es necesario utilizar tuberías rígidas. Las tuberías llevarán el gas hasta los inyectores del motor. Están fabricados de acero de forma que pueda soportar la alta presión.

Los conductos han de estar preparados para soportar la corrosión que causa el transporte del combustible. Además, los conductos que son rígidos tienen que ser capaces de aguantar tensiones causadas por la fatiga y si tienen alguna soldadura se ha de intentar minimizar las concentraciones de tensiones que conlleve una posible fractura.

7.1.3 Toma de llenado.

En el caso del GNC la toma de llenado tiene que estar diseñado para satisfacer los requisitos del sistema de llenado NGV1. Para ello se ha de utilizar un sistema con las siguientes características.

Presión	200-250 bar
Temperatura	-40°C - +121°C
Caudal	49,555 l/min

Tabla 8: condiciones de trabajo de la toma de llenado. [33]

Las boquillas están hechas de acero y pueden tener diferentes configuraciones. En la *Imagen 23* se detalla un tipo de toma de llenado, especificando longitudes en función de unos criterios de diseño.

Los criterios de diseño vienen especificados por una serie de letras y números que indican el tamaño, material, presiones en la que trabaja, configuración de la boquilla. Además, informa si la toma de contacto usa un filtro.

Cumpliendo dichos criterios de diseño las tomas de llenado son capaces de satisfacer las necesidades y los requisitos de seguridad del sistema de llenado NGV1, que es el sistema estandarizado en el caso de los turismos, que es el más lento.

La toma de contacto se sitúa, si hay espacio para ello, junto a la toma de gasolina, protegida con la misma tapa que la gasolina. Si no es posible, se le hará un hueco en el lateral del vehículo preferiblemente.

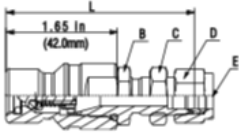
FMS-3*2-*AH					
					
Part Number	L - Length	B - Hex	C - Hex	D - Hex	E - Port End
FMS-302-4AH FMS-362-4AH	2.71" 68.8 mm	0.75" 19.0 mm	0.75" 19.0 mm	0.56" 14.3 mm	1/4" A-Lok Bulkhead
FMS-302-6AH FMS-362-6AH	2.78" 70.6 mm	0.75" 19.0 mm	0.75" 19.0 mm	0.69" 17.5 mm	3/8" A-Lok Bulkhead
FMS-302-8AH FMS-362-8AH	3.09" 78.4 mm	1.00" 25.4 mm	1.06" 27.0 mm	0.88" 22.2 mm	1/2" A-Lok Bulkhead
FMS-302-M6AH FMS-362-M6AH	2.98" 75.6 mm	0.81" 20.6 mm	0.75" 19.0 mm	0.55" 14.0 mm	6mm A-Lok Bulkhead
FMS-302-M8AH FMS-362-M8AH	2.76" 70.1 mm	0.75" 19.0 mm	0.75" 19.0 mm	0.63" 16.0 mm	8mm A-Lok Bulkhead
FMS-302-M10AH FMS-362-M10AH	3.09" 78.4 mm	1.00" 25.4 mm	1.06" 27.0 mm	0.75" 19.0 mm	10mm A-Lok Bulkhead
FMS-302-M12AH FMS-362-M12AH	3.09" 78.4 mm	1.00" 25.4 mm	1.06" 27.0 mm	0.87" 22.1 mm	12mm A-Lok Bulkhead

Imagen 23: toma de llenado de GNC. [33]

7.1.4 Válvulas.

Debido a que el combustible trabaja a altas presiones es necesario tener válvulas que controlen dichas presiones. Se situará un conjunto de válvulas en la salida del tanque y otras en el motor.

Las válvulas de tanque sirven para evitar excesos de presión, abriendo y cerrando el circuito cuando las condiciones son las óptimas.

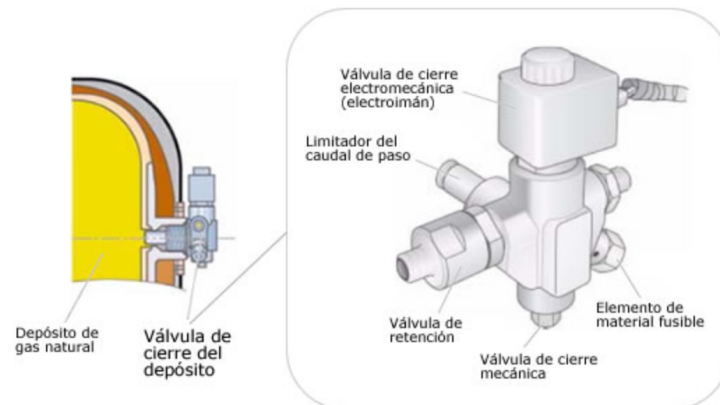


Imagen 24: válvulas de cierre de depósito. [34]

Las válvulas tienen como objetivo principal la seguridad del sistema y están compuestas de varias partes: de cierre electromagnético, de cierre mecánico, de retención y de limitador de caudal de paso.

Las válvulas situadas en el motor sirven para regular la presión a la llegada al motor, para ello baja la presión de 200 a 6 bar de forma el motor trabaje a unas presiones más bajas y por lo tanto sufra menos desgaste debido a la presión.

Para el correcto funcionamiento de las válvulas es necesario que el sistema de sensores del circuito funcione correctamente, para que las lecturas de las presiones sean las correctas, de forma que si es necesario las válvulas actúen, abriéndose o cerrando, para que la presión sea la que haga funcionar el sistema de forma óptima.

7.1.5 Indicador de nivel y selector de combustible.

Mediante el uso de un manómetro es posible conocer la presión a la que está el sistema a la vez que controlar que el regulador de presión está funcionando correctamente. La medida de la presión es mostrada en una pantalla al conductor y también la cantidad de gas que queda en el depósito de almacenamiento. De esta forma el conductor es

consciente de como esta funcionando el motor y si es necesario cambiar de combustible a gasolina.

Para dicho cambio el conductor posee de un selector de combustible que funciona con un sistema de control. El sistema de control contará con unos interruptores que permite seleccionar el combustible y que los displays muestren la selección, de igual forma actuará sobre el circuito del combustible, abriendo las válvulas de los tanques del combustible seleccionando y cerrando las del otro.

Si el motor es monovalente, utilizando únicamente GNC, será necesario introducir sensores de alta presión y de temperatura para conocer el estado del depósito de almacenamiento. En este caso el sistema de control solo actuará en el regulador de presión para mantener constante las presiones en el motor.

A parte de los sensores y las formas de actuar del sistema de control que se ha descrito, se mantienen los sistemas de control propios del motor de combustión además de los sensores que ya existían en el coche.

7.1.6 Seguridad.

Una de las características más importantes de un vehículo para un conductor es la seguridad que ofrece. En el caso de un vehículo que usa gas como combustible surgen dudas entre los posibles clientes, especialmente en lo que se refiere al depósito de almacenamiento. Aunque estas dudas, tras realizarse el estudio de la transformación del vehículo se demuestran que infundadas.

Como se ha visto con los tanques de almacenamiento tienen una gran resistencia y están diseñados para que en caso de accidente sean capaces de aguantar, teniendo mejor resistencia que, incluso, un tanque de gasolina. Pero en caso de producirse una rotura el gas se liberará rápidamente y debido a que su densidad es menor que la del aire se dispersa antes de que sea posible que se inflame.

Para demostrar la seguridad de los tanques se lleva a cabo tres tipos de ensayos, en los cuales se impacta el coche de las siguientes maneras:

- Frontal a 65km/h con un offset del 40% contra una barrera deformable.
- Lateral contra una barrera deformable de 950 kg a 50 km/h.
- Trasero con barrera rígida de 1800 kg a 54 km/h.

Tras estos ensayos, que están definidos por la normativa nº110 CEPE, el tanque tiene que quedar intacto sin ninguna rotura.

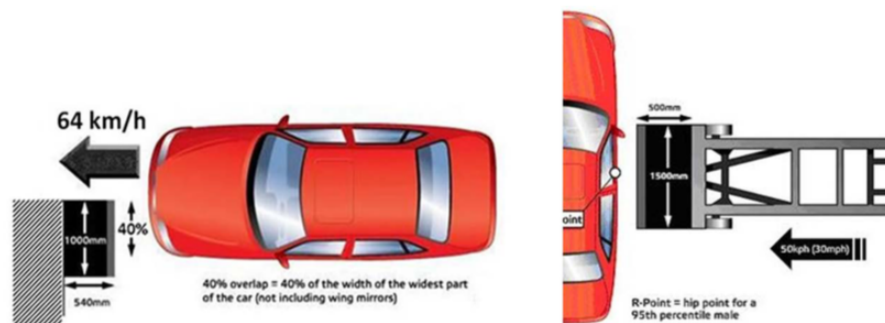


Imagen 25: ensayos de impacto, delantero (izquierda) y lateral (derecha). [12]

En caso de fuga, se añade al gas natural una sustancia odorante de forma que cuando se supere una concentración de un 0,3% de gas natural en el aire se pueda detectar. El riesgo real de la fuga será en el caso de que suceda en un recinto cerrado donde las concentraciones de CO son más elevadas, aunque la posibilidad de que inflame es menor que en el caso de gasolina.

Otra situación crítica en la seguridad con el uso de gas natural es en el repostaje. Para ello se ha llevado a cabo numerosas regulaciones para evitar que se produzcan fugas durante la recarga, aplicándose, como se ha explicado anteriormente, válvulas de no retorno o sistemas de perfecto acoplamiento para que no hay fugas. Además, en el caso del repostaje de gas es necesario estar accionando constantemente un botón de forma que la persona que reposta mantenga la atención constantemente.

7.2 Vehículos transformados a GLP.

La transformación de un vehículo a GLP tiene cosas en común con la de GNC, aunque también tiene requisitos especiales. Al igual que con el GNC, las transformaciones del GLP deben cumplir con el reglamento nº 115 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.

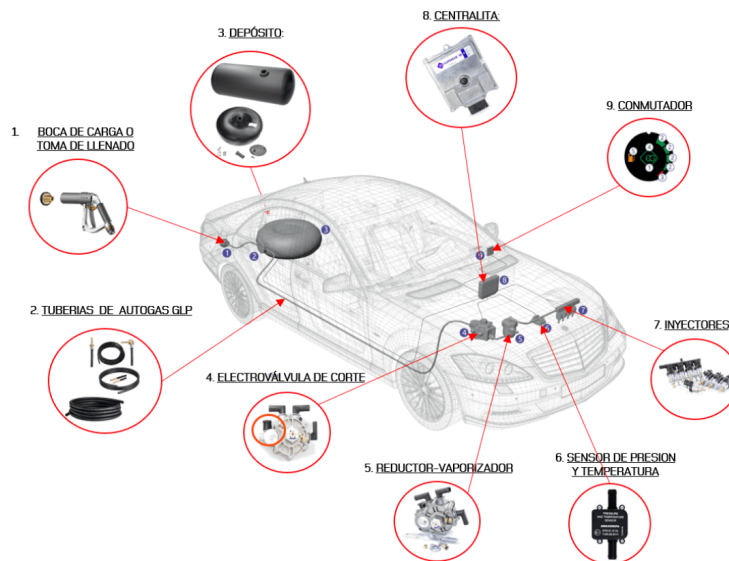


Imagen 26: nuevos componentes para el uso de GLP. [32]

7.2.1 Depósitos de GLP.

Para almacenar el GLP lo más común es el uso de un tanque de acero. En este caso del GLP el depósito puede ser tanto cilíndrico como redondo, toroidal. En ambos casos cumple con los requisitos de seguridad.



Imagen 27: depósitos de GLP para el uso vehicular. [31]

El depósito de GLP se puede situar de tres maneras distintas en el vehículo. La primera es utilizando un depósito toroidal interno, para ello se sitúa el depósito en el hueco de la rueda de repuesto, con esta solución no se pierde espacio del maletero. La segunda es el depósito toroidal externo, se instala en el lugar de la rueda de repuesto si dicha rueda está situada fuera del vehículo, debajo del maletero. Por último, se puede situar un depósito cilíndrico en el maletero, que se instala en el caso de que no haya rueda de repuesto, siendo una opción si el cliente no tiene problema con perder espacio en el mismo o si necesita mayor autonomía, ya que dichos tanques pueden llegar a 160 litros [32].

Los tanques en este caso han de soportar presiones mucho más bajas. Los requisitos del GLP en este caso son menores, ya que a 7 bar [31] el combustible está en estado líquido en condiciones normales.

En cuanto a las temperaturas que tiene que soportar el GLP son muy normales ya que se suele trabajar a 20°C [31], que es a la temperatura a la que a 7 bar está en estado líquido. Por lo que térmicamente el tanque tampoco sufre mucho.

Debido a que las condiciones en las que se opera el GLP son menos extremas los materiales sufren menos, aunque aun así se utilizan materiales con buena resistencia a la fatiga, a la corrosión y a impactos. Lo normal es que los tanques estén hechos de acero, como en el caso del GNC. Es más raro el uso del aluminio en este caso.

Como con el GNC es necesario revisar periódicamente estos depósitos para evitar la fractura de dicho depósito por fatiga. Para ello se le realizará ensayos no destructivos, como puede ser el uso de ultrasonidos.

7.2.2 Tuberías de GLP.

Dado que el vehículo va a utilizar un nuevo combustible es necesario instalar un sistema de transporte dentro del vehículo. Las tuberías conducen el GLP desde el depósito hasta la parte delantera del vehículo donde se conectan con las electroválvulas de corte, que están situadas en el motor. Debido al estado del combustible en cada momento de su transporte es posible distinguir entre dos tipos de tubería: alta presión y baja presión.

- Alta presión: son las que se transporta el GLP desde el tanque al motor, yendo en ellas el combustible en estado líquido. Pueden ser flexibles o rígidas. Siempre van instalados por la parte exterior del habitáculo.
- Baja presión: son los tubos que van a partir del vaporizador. Son flexibles ya que están sometidos a movimiento.



Imagen 28: tuberías flexibles para el uso vehicular. [32]

7.2.3 Toma de llenado.

Para el repostaje de los nuevos combustibles es necesario añadir una nueva toma. Dicha toma se situará en la zona de la toma de la gasolina si hay espacio y sino se tendrá que habilitar un hueco en el lateral del vehículo para ello. Estas tomas poseen una válvula que impide el retorno del gas al exterior.



Imagen 29: disposición de la toma de llenado de GLP. [32]

En el caso de usar GLP el vehículo, el repostaje también está diseñado para ser totalmente seguro. Aunque a diferencia del GNC, el GLP es más denso que el aire, por lo tanto, en el caso de fuga no es capaz de dispersarse tan fácilmente, esto conlleva que el sistema de repostaje esté diseñado para evitar fugas.

7.2.4 Reductor-vaporizador.

El vaporizador tiene como función cambiar de estado el GLP para que pase a estado gaseoso, y así mediante el regulador se reduzca la presión que llega a las tuberías de admisión del motor respecto a las tuberías de suministro. De esta forma el motor funciona de forma correctamente.

Este sistema se sitúa en la parte delantera del vehículo y tiene la capacidad de regular también la cantidad de gas que se suministra al motor.



Imagen 30: reductor-vaporizador. [31]

7.2.5 Conmutador y centralita.

Debido a que los vehículos transformados que usan GLP tienen también la opción de usar gasolina entonces es necesario añadir una centralita y un conmutador para optimizar la combustión del motor para los distintos combustibles y cambiar de combustible cuando sea necesario.



Imagen 31: unidad electrónica de control. [32]

La centralita tiene como función recoger la información de los diferentes sensores de presión, temperatura y almacenamiento de combustible y una vez obtenida esta información es capaz de optimizar la combustión para que la mezcla de los inyectores, los tiempos de inyección y las revoluciones a las que trabaja el motor sea lo más eficiente y por tanto el rendimiento del motor sea el mejor posible y el gasto el menor posible. Su posición en el coche es en la parte delantera, pero no muy cerca del motor para que no se eleve demasiado la temperatura y pueda funcionar correctamente.

El conmutador, en cambio, se sitúa en una posición cómoda para el conductor, gracias a su reducido tamaño se puede colocar en el salpicadero. Su función es dar la opción al conductor de decidir con que combustible circular. También da la información de la cantidad de GLP que queda en el depósito de almacenamiento. Por último, es capaz de

informar al conductor de que todo en el sistema de GLP funciona correctamente, informando de cualquier problema.

7.2.6 Válvulas.

El sistema de GLP posee numerosas válvulas para controlar las presiones y la circulación del líquido y el gas de forma que todo funcione correctamente.

En el caso de la zona del tanque, se incluye una multiválvula electrónica. Su función es hacer lecturas de nivel a la vez que controlar el flujo hacia el motor, en caso de accidente se cierra electrónicamente el paso del gas.

Otra función de esta válvula es la conexión al surtidor de GLP por un acoplamiento rápido y estanco. Como se ha explicado anteriormente, *Apartado 7.2.1*, esta válvula evita el retorno del combustible cuando está repostando. Además, evita el sobrellenado, ya que cuando llega al 80% [31] se cierra automáticamente.

Otra válvula que ha de añadirse al vehículo es una electroválvula, su función principal es el cortar el suministro de GLP cuando se cambia el combustible a gasolina, o cuando se apaga el vehículo. Se sitúa antes de el reductor-vaporizador en la parte delantera del vehículo.

7.2.7 Sensor de presión y temperatura.

Para que funcione correctamente la centralita y, por lo tanto, el motor es necesario añadir al sistema unos sensores de presión y temperatura. Se sitúan en múltiples puntos del sistema desde la admisión hasta el carril de inyectores.



Imagen 32: sensor de presión. [31]

El sensor de presión y de la temperatura del gas manda la información de ambas variables en la admisión para optimizar la combustión, reduciendo el consumo y aumentando el

rendimiento. Actualmente existen soluciones en el mercado que juntan el sensor de temperatura y presión en el mismo aparato.

7.2.8 Seguridad.

El GLP como con el GNC ha sufrido una fuerte reglamentación para reforzar su seguridad en cualquier caso y tratar de igualarlo a la que ofrece vehículos de gasolina. A diferencia que el GNC, el GLP tiene una densidad mayor del aire por lo que en caso de fuga el combustible no es capaz de dispersarse y por lo tanto se acumula en la zona cercana al suelo.

Para probar la seguridad de los sistemas con GLP se realizan unos ensayos bajo la normativa nº 115. Se realizan unas pruebas de impacto y de incendio.

- Prueba de impacto: la prueba estándar se basa en el impacto de un vehículo turismo a 60 km/h con un 70% de offset contra uno que está estacionado, y que dispone de un sistema de GLP. Es un impacto por la parte trasera del vehículo. Este ensayo demostró que el vehículo es capaz de sufrir este tipo de impacto sin sufrir daños importantes.
- Prueba de incendio: el caso de incendio es algo inusual hoy en día en los vehículos, pero el uso de un combustible gaseoso puede ser más impredecible. Para demostrar la seguridad de los sistemas de GLP se lleva a cabo una prueba por la que se coloca gasolina debajo del vehículo, en una zona cercana al depósito y se incendia. Tras el ensayo se observó que la válvula de presión solo se abre cuando el vehículo está completamente envuelto en llamas y, además, dirige el combustible hacia el suelo, demostrando la seguridad de los sistemas de GLP.

8. Costes de transformación.

En este apartado se hará un estudio sobre los costes de transformación para cada tipo de combustible, GNC y GLP. Además, se informará sobre los costes que conlleva el mantenimiento del vehículo.

8.1 Coste de transformación de un vehículo a GNC.

Uno de los requisitos para que se implante el GNC en el mercado de los vehículos es que el precio sea el más bajo posible. En el caso de los vehículos que producen los fabricantes que ya utilizan GNC el coste es mayor comparándolos con el mismo modelo sin utilizar GNC, como se muestra en la *Tabla 9*.

Modelo	Precio	
	GNC + gasolina	Gasolina
Audi A3 Sportback	30.920 €	27.650 €
Volkswagen Golf	25.163 €	21.320 €
Fiat Panda	16.450 €	17.950 €
Seat Mii	14.190 €	12.060 €

Tabla 9: comparación de precios de los vehículos mostrados en el apartado 3 en su versión con y sin GNC. [40]

Como se puede ver en la Tabla 9 los precios de los vehículos que de serie llevan GNC es unos 2.000 € mayor que los que solo usan gasolina, excepto en el caso del Fiat Panda que no tiene una versión exacta del vehículo que usa GNC. Esta diferencia de precio es debido a los componentes que hay que añadir al vehículo. También se puede destacar de la comparativa de precios que cuando más “lujoso” sea el vehículo mayor será la diferencia de precios, esto se debe al uso de componentes más sofisticados y por lo tanto se espera un rendimiento mayor, más similar al de la gasolina.

Aunque estos precios pueden verse reducidos por subvenciones proporcionadas por las comunidades. Por ejemplo, en la Comunidad de Madrid está llevando a cabo el II Plan de Movilidad Urbana Sostenible (II Plan Mus), que se centra en la compra de nuevos vehículos propulsados por energías alternativas a los combustibles tradicionales. Con dicha subvención en el caso del gas natural se reduce el precio del vehículo en 2.500 € [39], además, de los 1.000 € que algunos concesionarios ofrecen por la compra de esta clase de vehículos.

En cuanto a los vehículos que se transforman para que funcionen con GNC, el precio depende de diferentes factores como: la autonomía que se quiere tener con el combustible gaseoso, el número de cilindros del motor e incluso el tamaño de vehículos.

Para realizar la transformación es necesario recurrir a talleres que tengan la capacidad y el conocimiento para realizar la transformación. Un ejemplo es el grupo Gasmoción, que posee la exclusiva de las marcas italianas GFI y ZAVOLI, que son sistemas de alta calidad y fiabilidad que además tiene continuas mejoras del software e innovaciones que hace que sea un sistema puntero.

El kit de transformación de GFI es capaz de llegar a todo tipo de motores ofreciendo un alto rendimiento en un gran rango de potencias. Estos kits tienen una garantía de 2 años que incluyen la mano de obra y los componentes. Cumplen todas las homologaciones y regulaciones necesarias.

Los kits ZAVOLI destacan por su rendimiento, ya que es posible una puesta a punto muy exhaustiva. Están especialmente diseñados para motores de inyección directa. Poseen 2 años de garantía en los componentes, además, de en la mano de obra. Todos los componentes cumplen con las homologaciones y las certificaciones requeridas.

Otra opción es el kit STAG. Este kit puede usar inyección indirecta y directa vaporizada. Tiene 2 años de garantía y el tanque depende de vehículo. En la *Tabla 10* se especifican los distintos precios:

Tipo de equipo	Precio con IVA
3-4 cilindros	1560,9 €
5-6 cilindros	2044,9 €
8 cilindros	2407,9 €
Directa vaporizada 4 cilindros	2044,9 €

Tabla 10: tabla de precios con IVA del kit Stag. [41]

A estos precios habría que añadir la ITV de homologación además de la mano de obra.

8.2 Coste de transformación de un vehículo a GLP.

De la misma forma que con los vehículos de GNC es posible encontrar vehículos de fábrica que funcionan con GLP como transformar vehículos. En el caso de los vehículos que funcionan con GLP de fábrica se puede ver una comparativa de precios en la *Tabla 11*.

Modelo	Precio	
	GLP + gasolina	Gasolina
Opel Corsa	17.450 €	15.950 €
Hyundai i10	13.765 €	9.851 €
Fiat Panda	14.900 €	15.959 €

Tabla 11: comparación de precios de los vehículos mostrados en el apartado 3 en su versión con y sin GLP. [40]

En la *Tabla 11* se puede observar que la diferencia de precio es similar a la de los vehículos con GNC, en torno a 2.000-2.500 €. Esta diferencia de precio se debe a la implantación de los nuevos componentes que son necesarios para que funcione con GLP. Al igual que con el GNC, el Fiat Panda tiene un precio menor para el modelo que utiliza GLP, aunque en su versión gasolina es posible encontrarlo a un precio de 10.500 € [40].

Los precios que aparecen en la *Tabla 11* pueden sufrir cambios debido a subvenciones. Como con el GNC, el GLP también está dentro de las subvenciones del II Plan Mus, que promueve la Comunidad de Madrid. Dentro de este plan está estipulado que los vehículos que usen GLP tengan una subvención de 1.500 € [39]. Además, existe una ayuda de los concesionarios, que se aplica también al GNC, que reduce el precio del vehículo en 1.000 € más. Con estas ayudas hace que la compra de un vehículo que de fábrica funciona con GLP resulte atractivo para un conductor que esté buscando un nuevo vehículo.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)



Talleres franquicia
 Talleres mantenimiento
 Equipo que comercializan: BRC Gas Equipment



Talleres
 Equipo que comercializan: Landirenzio



Red de talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Romano Autogás



Talleres
 Equipo que comercializan: Vialle



Red de talleres instaladores
 Equipo que comercializan: EuropeGas y AC Stag



Talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Stag



Talleres instaladores
 Equipo que comercializan: STAG y Autogasecológico



Red de talleres instaladores
 Equipos que comercializan: GFI y ZAVOLI



Red de talleres instaladores
 Equipo que comercializan: STEFANELLI



Talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Emer



Red de talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Imega



Talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Romano Autogas



Talleres instaladores
 Equipo que comercializan: Lovato



Talleres instaladores



Talleres instaladores



Distribuidores de AUTOGAS ITALIA



Transformadores dual-fuel

Imagen 33: talleres que ofrecen la instalación de GLP, mantenimiento y comercializan equipos. [3]

En el caso de querer transformar un vehículo para que funcione con GLP es necesario recurrir a talleres especializados, que posean los medios y la cualificación para añadir los componentes necesarios al vehículo de forma que se pueda garantizar la seguridad del vehículo cuando circule. La organización Autogas, que se dedica al estudio del GLP en España y tiene como socios empresas como Repsol, Cepsa y Fiat Chrysler Automobiles, ofrece una serie de talleres en su página web.

De entre los talleres recomendados por Autogas está VM Autogas que instala los kits de GLP a vehículos con motor de gasolina y no más antiguos de 2001 o que cumplan como mínimo la norma Euro 3. En las siguientes tablas se especifican los precios de los diferentes kits para cada vehículo.

El kit ALEX tiene dos variantes el *standard*, que lleva un depósito de 45 litros y 2 años de garantía, mientras que el *premium* el depósito es de 100 litros y tiene 4 años de garantía. En ambos casos funciona con inyección indirecta. En los precios de la *Tabla 12* no esta incluido la ITV de homologación.

Tipo de equipo	Precio <i>standard</i> con IVA	Precio <i>premium</i> con IVA
Optima Nano con Shark 1200 (3-4 cilindros 42-151 kW)	1149,5 €	1318,9 €
Optima Expert con Shark 1200 (3-4 cilindros 42-151 kW con distribución variable)	1197,9 €	1361,25 €
Optima Expert con Shark 1500 (5-6 cilindros hasta 226 kW)	1470,15 €	1651.65 €
Optima Expert con Shark 1500 (8 cilindros hasta 310 kW)	1754,5 €	1996,5 €

Tabla 12: tabla de precios con IVA de el kit ALEX. [41]

Otra opción que ofrece VM Autogas es el kit Prins, este kit tiene varias variantes, siendo posible la inyección directa, indirecta vaporizada y líquida. Este kit tiene 2 años de garantía y el depósito varía en función del vehículo. En la *Tabla 13* se especifican los precios:

Tipo de equipo	Precio con IVA
Prins 3/4 cilindros	1875,5 €
Prins 5/6 cilindros	2420 €
Prins 8 cilindros	2904 €
Directa vaporizada 4 cilindros	2601,5 €
Directa vaporizada 6 cilindros	3206,5 €
Directa vaporizada 8 cilindros	3738,9 €
Directa líquida, precio a partir de	3327,5 €

Tabla 13: tabla de precios con IVA del kit Prins. [41]

A los precios mostrados habrá que añadir la mano de obra para incorporar los componentes al vehículo, además de la ITV de homologación.

Otro grupo de talleres recomendado por Autogas es Ircongas. Este grupo tiene la ventaja de que a parte de sus propios talleres poseen una red de talleres adheridos por todo España haciendo posible la transformación del vehículo en lugares cercanos a los posibles clientes. Además, asegura que la calidad de la transformación es homogénea en toda su red de los talleres.



Imagen 34: red de talleres asociados con Ircongas. [32]

8.3 Coste de mantenimiento.

A parte del coste de transformación será necesario tener en cuenta que los vehículos que usan combustible gaseoso requieren según las distintas normas que lo regulan un mantenimiento más estricto que el del un vehículo con un combustible tradicional.

El coste de mantenimiento es variable en función del uso que reciba el vehículo. Habrá ciertas revisiones que serán obligatorias, cada 4 años hay que revisar los depósitos y los conductos del gas, para así evitar posibles fugas. Además, habrá que cambiar filtros del gas cada 30.000 km. En el caso de la centralita, será bueno revisarla con el paso de los años para que actúa de forma correcta sobre el motor obteniendo el mejor rendimiento posible.

El depósito de almacenamiento no solo necesita mantenimiento cada 4 años, sino que además cada 20 años es obligatorio cambiarlo. Esto lo recoge el reglamento nº 110 de la CEPE aunque no se espera que sea necesario muchos cambios de tanque ya que la vida media de un vehículo en España es mucho menor.

El mantenimiento del depósito y la sustitución son las grandes diferencias de mantenimiento de los vehículos que usan combustible gaseoso a diferencia de los vehículos de combustible tradicional, por lo tanto, el gasto en mantenimiento que requieren estos vehículos es pequeño en comparación con los de combustible tradicional y apenas supondrá un inconveniente para el conductor.

9. Proceso de homologación.

Tras llevar a cabo la transformación del vehículo es necesario pasar por una serie de ensayos en los que se comprueba que cumple los requisitos de seguridad y de emisiones de contaminantes. Dichos ensayos están regulados por la Unión Europea. A parte, para homologar un vehículo transformado será necesario cumplir con ciertos pasos incluidos en el Real Decreto 750/2010, de 4 de junio, y al ser un vehículo con combustible gaseoso será necesario que cumpla las legislaciones nº 110 y nº 115 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.

9.1 Ensayos de homologación de vehículos.

Desde un punto de vista del fabricante para que su vehículo sea homologado, ya sea gasolina, diésel, GNC o GLP, será necesario llevar a cabo tres tipos de ensayo. Estos ensayos están destinados a los fabricantes de vehículos.

9.1.1 Aprobación de tipo.

Para llevar a cabo estos ensayos el fabricante ha de seleccionar un vehículo “tipo” que servirá para homologar el resto de los vehículos con las mismas especificaciones.

Una vez escogido el vehículo “tipo” se le somete al ensayo en el “dinamómetro de chasis”, conocido también como el banco de rodillos. En este ensayo se puede someter al vehículo a ciclos de conducción, que consisten en un periodo de aceleración, cambio de marcha, velocidad constante, desaceleración y ralentí. Todo este proceso se hace en condiciones ideales de laboratorio, estas condiciones son de humedad y temperatura constante. Este sistema es capaz de simular las inercias de un vehículo en carretera llana sin curvas, además, de cualquier fuerza externa.

Los niveles de emisión son medidos directamente del tubo de escape, determinando los gramos de contaminante por km. Los niveles de emisión dependen de factores como el tamaño del vehículo, la carga, el tipo de combustible (en este caso, GNC y GLP), la aceleración, el cambio de marcha, y por lo tanto hay que ajustar el ensayo a cada vehículo.

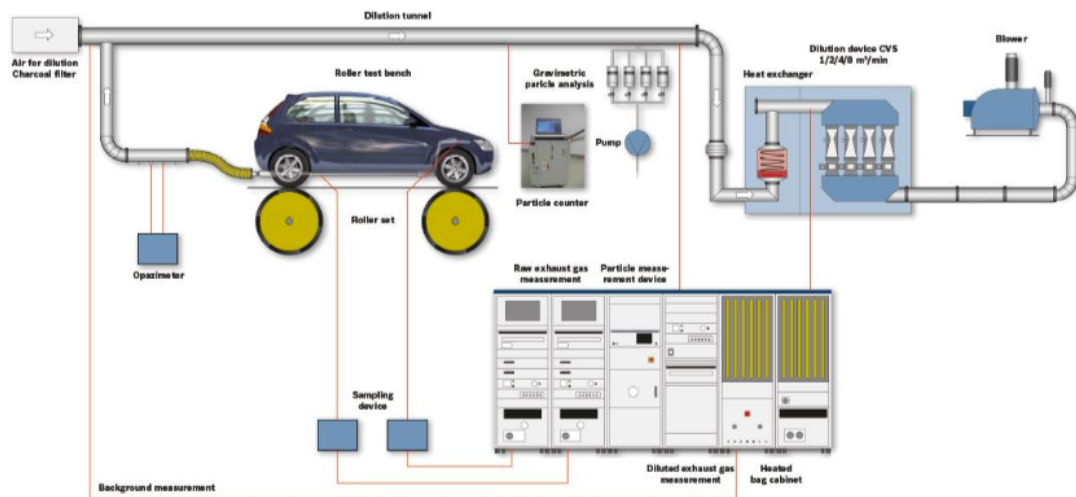


Imagen 35: esquema del banco de pruebas del coche tipo. [35]

9.1.2 Ensayo de homologación en condiciones reales de conducción.

Este ensayo es complementario al del laboratorio, ha de efectuarse en condiciones reales de conducción. Este ensayo se ha añadido recientemente al conjunto de ensayos necesarios para homologar el vehículo, entrando en vigor en septiembre de 2017.

Para la realización del ensayo el vehículo tiene que circular entre 90 y 120 min [35]. El ensayo está pensado para que se realice en un rango de temperatura y altitud. Además, el vehículo circulará en entorno urbano, rural y en autopista, en las que se llevará unas velocidades predeterminadas, especificadas en la *Tabla 14*.

Condiciones ambientales:		
Altitud	Normal: ~ 700 m	Extendida: 700 ~ 1300 m
Temperatura	Normal: 0 ~ 30 °C	Extendida: -7 ~ 0 °C, 30 ~ 35 °C
Tipo de trayecto:		
Urbano	0-60 km/h 34% ± 10	Velocidad media 15-30 km/h Periodos de parada definidos
Rural	60-90 km/h 33% ± 10	
Autopista	90-145 km/h 33% ± 10	90-110 km/h >110 km/h al menos 5 min

Tabla 14: condiciones de ensayo de conducción real. [35]

En este ensayo se mide las emisiones utilizando el sistema portátil de medición de emisiones (*PEMS- Portable Emissions Measurement System*). Dicho sistema se sitúa en la parte trasera del vehículo, conectándose al tubo de escape, de esta forma mide en

tiempo real las emisiones de determinados contaminantes, como son CO, CO₂, NO y NO₂, expresándolo en gramos por kilómetros, como se muestra en la *Ecuación 6*. El peso del aparato, que varía entre 30-150 kg [35], puede afectar al consumo y por lo tanto a las emisiones, desvirtuando el resultado.

$$\text{Emisiones (g/km)} = \frac{\text{Concentración del contaminante (\%)} \times \text{Volumen de gases de escape (m}^3\text{)} \times \text{Densidad del contaminante (g/m}^3\text{)}}{\text{distancia (km)}}$$

Ecuación 6: cálculo de las emisiones del escape. [35]

Lo más difícil de este sistema de medida de este tipo, es la propia medida de las emisiones, debido a las vibraciones, el espacio limitado, y las altas temperaturas del escape. Es por eso por lo que los PEMS han de validarse antes y después de realizarse el ensayo en un banco de rodillos con el equipo instalado, teniendo que cumplir los requisitos establecidos por el ensayo en condiciones reales.

9.1.3 Conformidad en servicio.

Este ensayo se viene realizando desde hace un tiempo con vehículos pesados y está incluido en el reglamento Euro VIC, estudiándose actualmente su revisión para poder definir las condiciones necesarias para aplicarlo en vehículos ligeros. Este tipo de ensayo impone unas condiciones sobre temas como las velocidades medias en ciertos entornos, el punto de partida de un viaje en función del vehículo, duración de los recorridos.

9.1.4 Nuevos reglamentos de homologación.

Tras destaparse ciertos casos en los que el vehículo tipo no representaba al resto de la flota de vehículos la Comisión Europea está planteando una serie de cambios en los ensayos buscando conseguir tres objetivos:

- Reforzar la independencia y calidad del ensayo que permita la salida al mercado de un vehículo.
- Vigilancia del mercado, para conseguir la conformidad de los automóviles en circulación.
- La capacidad de restringir o clausurar los servicios técnicos que sean muy permisibles en los exámenes.

Mediante el cumplimiento de estos objetivos la Comisión Europea busca conseguir que se refuerce el sistema de homologación de vehículos de motor, consiguiendo un mayor nivel de seguridad, además, de unos mejores resultados en la reducción de emisiones

contaminantes. También se busca aplicar nuevas tecnologías presentes en el mercado que mejoren las medidas, y que por lo tanto hagan más fiables los resultados.

Con estos nuevos reglamentos también se busca especialmente el control de las autoridades de homologación y para ello se llevará a cabo un sistema de auditorías, en las cuales serán revisadas por dos autoridades de homologación de otros estados miembros. Esto sucederá al menos una vez cada 5 años. Los resultados de la auditoría se harán públicos. En caso de que la autoridad de homologación cuente con acreditaciones reconocidas internacionalmente no será necesario realizar dichas evaluaciones.

En cuanto a los servicios técnicos serán los organismos nacionales los que se encarguen de evaluarlos y serán capaces de llevar a cabo ensayos de homologación bajo la responsabilidad de las autoridades de homologación.

9.2 Homologación de vehículos particulares.

Una vez estudiado el proceso para homologar un vehículo por parte del fabricante nos centramos en el caso específico de que sea necesario homologar un vehículo particular, como puede ser el caso de un vehículo transformado para que use GNC/GLP. En este apartado nos centraremos en el caso general de un vehículo particular, siguiendo las normas especificadas en el Real Decreto 750/2010, de 4 de junio.

Para empezar el Real Decreto define la homologación individual como “procedimiento por el cual se certifica que un vehículo particular, ya sea singular o no, cumple las disposiciones administrativas y requisitos técnicos del presente real decreto.” [36]. En el procedimiento de homologación individual de un vehículo se seguirá lo previsto en la Directiva 2007/46/CE, de 5 de septiembre, cumpliendo con lo especificado en el Real Decreto, se especifica los pasos que se han de cumplir para que un vehículo particular puede ser homologado y circular:

- a) Solicitud de homologación individual del vehículo
- b) Inscripción en el Registro de fabricantes, en el caso de que la solicitud de homologación se formule por una persona física se podrá omitir esta exigencia.
- c) Ficha reducida, sellada por el servicio técnico.
- d) Acta de ensayo de homologación individual expedida por el servicio técnico.
- e) Si se cumplen los anteriores requisitos se llevará a cabo la homologación individual, asignándole un número de homologación.

La solicitud de homologación deberá hacerse a la autoridad de homologación, obteniendo la autorización expresa, en la cual consta acompañada de una petición justificada la memoria de las razones por las cuales se incumplen parte del reglamento y las medidas que se han realizado, aportando los actos reglamentarios que la cumplan. La autoridad de homologación podrá añadir actos reglamentarios, los cuales ha de cumplir, aún cuando el vehículo no se encuentre bajo las condiciones del reglamento añadido.

En el proceso de homologación será necesario realizar una inspección técnica unitaria, de forma previa a la matriculación en la que se verificará el vehículo con la documentación aportada, además, se revisará el estado del vehículo en lo que refiere a la seguridad vial y a la protección del medio ambiente. Para realizar dicha inspección técnica el solicitante deberá entregar la solicitud y acompañándola:

1. Ficha reducida particularizada para el vehículo. Podrá ser emitida por el fabricante, por la autoridad de homologación o por un servicio técnico competente. Se podrá, también, extender por un técnico competente, la ficha reducida se realizará basándose en la revisión física del vehículo.
2. Informe favorable del servicio técnico.
3. Ficha de características técnicas indicada en el anexo correspondiente a cada vehículo.
4. Resolución de la autorización emitida por la autoridad de homologación o copia autenticada de la misma.

En el caso de que sea favorable, la tarjeta de ITV será emitida por el organismo que haya realizado la inspección técnica unitaria.

9.3 Normas específicas para combustibles gaseosos.

Una vez conocido el proceso de homologación que requerirá el vehículo de GNC/GLP en el caso de que sea de fabricación de serie con combustible gaseoso o en el caso de que sea producto de una transformación, es necesario estudiar las normas que se centran específicamente en el uso de combustibles gaseosos.

9.3.1 Reglamento nº 110 de la CEPE.

Este reglamento se centra plenamente en regular los componentes específicos para el uso de gas natural, ya sea en su estado licuado o comprimido, en vehículos de motor. En el podemos encontrar las prescripciones relativas a los componentes, la solicitud de homologación, requisito necesario para la homologación del vehículo como se explicó en

el anterior apartado. Además, se especifica las diferentes sanciones en el caso de falta de conformidad de la producción.

Respecto a la solicitud de homologación, el reglamento nº 110 especifica que se ha de entregar por triplicado, constando la descripción del vehículo, una descripción detallada del tipo de componentes específicos o de componente multifuncional, además, de añadir planos detallados a una escala adecuada. En el caso de que el servicio técnico correspondiente lo requiera, se facilitará muestras de los componentes, y si lo solicitan, se proporcionarán muestras complementarias.

Este reglamento estipula también como deben de marcarse los distintos componentes del sistema de GNC. Por ejemplo, el depósito debe tener las siguientes marcas, que deben ser legibles e indelebles: número de serie, capacidad en litros, marca GNC, presión de funcionamiento/presión de ensayo (MPa), masa (kg), el año y mes de homologación y la marca de homologación.

La marca de homologación llevará un número de homologación, en el caso de la *Imagen 36*, será 012439, además lleva una E seguida de un número que es el identificativo del país donde se ha homologado.



$a \geq 8 \text{ mm}$

Imagen 36: marca de homologación de un componente para GNC/GNL. [29]

Al final de la marca se pone una letra que puede ser: L, cuando se puede utilizar con GNL, M, el producto se puede utilizar con temperaturas moderadas o C que puede utilizar con temperaturas frías.

A parte de tratar temas de homologación de piezas el reglamento también especifica los diferentes ensayos que han de pasar los componentes, imponiendo unos resultados mínimos, para que sean seguros en caso de accidente o la duración de uso de la pieza este a la altura de los estándares mínimos del mercado. En caso de que no se cumplan estos mínimos el reglamento especifica las diferentes sanciones y la manera de actuar.

9.3.2 Reglamento nº 115 de la CEPE.

Este documento regula los sistemas de adaptación específicos para GLP y GNC que tienen como fin ser instalados en vehículos de motor para la utilización de GLP o GNC en su sistema de propulsión. Este documento entró en vigor el 10 de junio de 2014 [37], en el se puede encontrar una estructura similar a la del Reglamento nº 110, con la solicitud de homologación correspondiente para los componentes, las marcas, especificaciones relativas a los sistemas de adaptación, además, de las sanciones en caso de incumplir las normas.

En cuanto a la solicitud de homologación, sigue el mismo proceso que el Reglamento nº 110, requiere por triplicado los siguientes documentos: descripción del sistema de adaptación, incluyendo todos los datos como los números de homologación de cada componente, presentes en el anexo 3A del reglamento, para GLP, y 3B del reglamento, para GNC. Será necesario también especificar todas las modificaciones aplicadas al vehículo original, si el vehículo es bicomcombustible. También habrá que demostrar el cumplimiento de las especificaciones establecidas para los sistemas de adaptación impuestos al vehículo. Por último, para acabar la solicitud de homologación es indispensable demostrar la existencia de una manual de usuario final además de un manual de instalación y en el caso de los fabricantes una muestra del sistema de adaptación específico.

Una vez cumplimentada la solicitud de homologación se llevará a cabo la homologación que será concedida si se cumplen los requisitos especificados en el apartado 6 del reglamento que describe las especificaciones relativas a los sistemas de adaptación. Estas especificaciones se centran en las diferentes partes de vehículo, como el sistema de inyección, el combustible y depósito, además, trata sobre las contaminantes y la cantidad permitida. Indicando los ensayos que se realizarán al coche para medir emisiones, ya sea en el banco dinamométrico o en circulación. El reglamento especifica todos estos requisitos para ambos combustibles, GNC y GLP.

Una vez se cumplan todos los requisitos se le adjudicará a cada vehículo un número de homologación que se indicará en la marca de la pieza, que será legible e indeleble. La estructura de la marca es similar a la del Reglamento nº 110, empieza con una “E” seguido de un número que identifica el país en el que se homologó, después sigue una referencia que especifica que está homologado bajo la norma 115 y, por último, el número de homologación. Se muestra un ejemplo de la marca de homologación en la *Imagen 37*.

E3 #115R-000000	
NAME OR TRADE MARK:	
TYPE: LPG/CNG	Date:
☐ VAPORIZER/REGULATOR ☐ GAZ FUELLING SYSTEM ☐ SAFETY DEVICE ☐ CONTAINER ☐ ☐ ☐	

Imagen 37: marca de homologación del reglamento nº 115. [37]

De la misma forma que el Reglamento nº 110 se especifica las sanciones que se llevarán a cabo si no se cumplen con los requisitos especificados en el reglamento.

9.3.3 Otros reglamentos.

Para regular el uso de vehículos con combustible gaseoso hay más documentos a parte del Reglamento nº 110 y 115.

Un ejemplo sería el Real Decreto 919/2006 que se encarga de regular el sistema de repostaje en España, estandarizando el llenado NGV1 para combustibles gaseosos en turismos. Además, trata sobre los requisitos de seguridad que ha de cumplir las estaciones de repostaje y los diferentes componentes que debe que tener para poder manejar el repostaje. Este documento es especialmente importante en el caso del GNC, ya que es un combustible que debido las presiones a las que se trabaja obliga a utilizar una serie muy compleja de sistemas para poder repostar de forma segura y manteniendo las condiciones necesarias para el correcto funcionamiento de combustible.

Otras normas reguladoras que hay que tener en cuenta son las que especifican los requisitos de los depósitos de combustible. Algunas de estas normas aparecen en el Reglamento nº 110 y 115, unos ejemplos de esas normas son:

- ISO TC58/SC3: Depósitos de gas en vehículos.
- ISO/DIS 11439: Cilindros a alta presión para almacenaje de gas natural como combustible para vehículos.
- ISO 14469: Sistemas de conexión para el llenado de depósitos de CNG.
- ISO/DIS 19078: Inspección de depósitos de CNG en el vehículo.

Todas estas normas han de tenerse en cuenta cuando se lleva a cabo la transformación del vehículo para que sea lo suficientemente seguro para su uso.

9.4 Inspección técnica de lo vehículos con combustible gaseoso.

En el caso de la inspección técnica de los vehículos con un combustible gaseoso será similar a la de un vehículo común, aunque también tiene una parte específica en las que se revisan los componentes para ver que cumplan todos los requisitos, como especifica el capítulo 9 del Manual de procedimiento de inspección de las estaciones I.T.V. de enero de 2012 del Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

En el Manual detalla que en la inspección se mostrará especial atención a las fijaciones de los equipos, el estado del sistema, en la homologación de todos los componentes, comprobando la placa reglamentaria. Se utilizará como reglamentación referencia en los casos generales: Real Decreto 866/2010 y el Real Decreto 750/2010 [38]. En el caso de reglamentación más particular se seguirá el Reglamento CEPE/ONU 115R y 110R o la Norma UNE 26525 [38].

Gracias a estos reglamentos será posible determinar qué será considerado un defecto leve (DL), grave (DG) y muy grave (DGM). En caso de ser grave o muy grave el vehículo no podrá circular por las vías públicas, excepto para el traslado al taller y a la estación I.T.V. En la *Tabla 15* se informa de que como se catalogan los fallos.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

	Calificación		
	DL	DG	DGM
EN EL CASO DE LOS VEHÍCULOS ALIMENTADOS CON GLP:			
1. Instalación en vehículo no autorizado:		X	
2. Depósitos no reglamentarios:		X	
3. Defectos de estado del depósito, tuberías, uniones y/o componentes del equipo de gasificación:	X	(X)	
...Fugas		X	(X)
4. Distancia del depósito al motor, tubo de escape o silenciador insuficiente:		X	
5. En su caso, inexistencia de orificios en el espacio cerrado ocupado por el depósito:		X	
6. En su caso, existe comunicación entre el espacio ocupado por el depósito y/o las tuberías y el ocupado por los viajeros:		X	
7. Fijación del depósito al bastidor defectuosa:	X	(X)	
8. Distancia del depósito al suelo no reglamentaria:		X	
9. Retimbrado del depósito o del equipo de gasificación caducado:		X	
10. Material de tuberías inadecuado:		X	
11. Defectos de estado de racores y terminales:	X		
12. Tuberías de presión sometidas a vibraciones:	X	(X)	
13. Distancia entre puntos de fijación de la tubería al bastidor excesiva:	X	(X)	
14. Fijación del equipo de gasificación al bastidor defectuosa:	X	(X)	
15. Componentes del equipo de gasificación no homologado:		X	
16. Elementos del sistema de gasificación no accesible:		X	
17. La válvula de alimentación de GLP no se cierra automáticamente al desconectar el motor o en caso de fallo eléctrico:		X	
18. En su caso, componentes eléctricos no aislados en las cercanías del depósito o las tuberías:		X	
19. En su caso, inexistencia de placa reglamentaria:		X	
EN EL CASO DE LOS VEHÍCULOS ALIMENTADOS DE GNC:			
20. El vehículo no dispone o no se encuentra en vigor el informe de inspección según norma UNE 26525		X	

Tabla 15: clasificación de defectos en vehículos con combustible gaseoso. [38]

De satisfacer todos los requisitos impuestos por usar un combustible gaseoso como los inherentes a todos los vehículos, el vehículo gaseoso podrá pasar la inspección técnica y circular con total seguridad.

10. Conclusiones.

Como se ha ido demostrando durante el proyecto, los combustibles gaseosos, GNC/GLP, son una solución tan buena como la hibridación eléctrica, con numerosas ventajas y es por ello por lo que cada vez más fabricantes empiezan a invertir en esta tecnología,

VENTAJAS

- La ventaja más evidente, que es el objetivo principal de esta transformación es la **reducción de las emisiones**. Con el uso de combustibles gaseosos se reduce las emisiones de CO₂ en el caso de GLP un total de un 10% y de GNC un 23%. En el caso de NO_x se reducen claramente comparándolo con el uso del diésel, GNC y GLP producen una tercera parte. Estos combustibles tienen la opción de ser purificados antes de ser utilizados, por lo que se puede eliminar los compuestos de azufre presentes en el combustible, reduciendo hasta un 95% las emisiones de SO₃⁻ y SO₄⁻. En cuanto a las emisiones de CO y HC se mantienen relativamente constantes respecto al uso de gasolina, siendo superiores a las del gasóleo. Del mismo modo que la gasolina se puede considerar que la emisión de partículas, PM_{2,5} y PM₁₀, es nula. Además, es posible añadir sistemas de tratamientos de gases de escape para reducir aún más las emisiones de contaminantes, aunque estos sistemas son complicados de que funcionen de forma óptima con estos combustibles ya que requieren unas temperaturas de combustión difíciles de alcanzar. También es destacable la reducción de la contaminación **acústica**, ya que con GNC/GLP el ruido se reduce un 50% haciéndoles atractivos para el uso urbano.
- El gas natural se puede fabricar y recibe nombre de biogás, por lo que posible tener un **suministro sin fin** del combustible, un ejemplo de esta situación es el sistema de recogida de basura de Madrid que funciona con el biogás producido con los deshechos orgánicos que recoge.
- La **transformación del vehículo es fácil**. Para llevarla a cabo será necesario instalar depósitos para el nuevo combustible, en el caso del GNC el depósito tiene que soportar unas presiones muy altas por lo que será necesario utilizar materiales que sean capaces de soportarlas. Además, habrá que añadir una toma de llenado, que debe tener una válvula que evite el retorno del combustible cuando se llene, aumentando así su seguridad. Desde el depósito saldrán tuberías que lleven el combustible al motor, estas tuberías tendrán que estar diseñadas para soportar altas presiones a la vez que fatiga. En el caso del GNC habrá que añadir un conmutador que sirva para seleccionar el combustible en cada momento, y para eso también será necesario un indicador de nivel, para saber la cantidad de combustible gaseoso queda.

Otro componente importante en el caso del GNC son las válvulas, especialmente las situadas en el motor que reducen la presión haciendo posible que se produzca una combustión segura. En el caso del GLP será necesario añadir un vaporizador y un reductor de presión para cambiar de estado el combustible, a gaseoso, ya que en el depósito está en estado líquido, y reducir la presión para la combustión. Este combustible también necesita una centralita que controle la mezcla para que el motor funcione de forma óptima, reduciendo consumo, emisiones manteniendo en la medida de las posibilidades las prestaciones. También hay que añadir una electroválvula que cierre el suministro del combustible gaseoso cuando se use la gasolina, durante el arranque y cuando el vehículo está apagado.

- El **motor sufre pocos cambios con la transformación**. El cambio más grande es la introducción de un sistema de **inyección indirecta** para el combustible gaseoso, esta suele ser la solución más común que se aplica a la inyección ya que de esta forma la mezcla de GNL/GLP con el aire es más homogénea cuando se produce la combustión y los inyectores no sufren sobrecalentamiento, ya que la inyección no se hace en la cámara de combustión. En el caso de usar el sistema de inyección directa de la gasolina será necesario añadir un anillo de teflón para evitar que se sobrecaliente, ya que cuando pasa por el inyector combustible líquido se refrigera, pero, en cambio cuando pasa combustible gaseoso se eleva la temperatura hasta sobrecalentarse. En cuanto al ciclo que sigue la combustión, es posible realizar unos pequeños cambios para que el rendimiento obtenido mejore. Los nuevos ciclos se llaman Ciclo de Miller y Ciclo de Atkinson. El Ciclo de Miller se caracteriza por cerrar un poco antes que el Ciclo de Otto la admisión, de esta forma se consigue una mejor distribución de la mezcla en cámara. El Ciclo de Atkinson cierra la admisión más tarde que el Ciclo Otto, consiguiendo mejor rendimiento que un ciclo de presión limitada.
- La **seguridad del vehículo es igual o superior** que la de un vehículo de gasolina. Debido a las estrictas regulaciones los componentes que se añaden al vehículo hacen que se mantenga la seguridad. Un ejemplo es el depósito de almacenamiento que está diseñado para que en caso de sufrir un impacto el vehículo no se rompa, de forma que no haya posibilidad de que se escape el gas y produzca un incendio. En caso de que se produzca una grieta el GNC se fugará de la forma más segura, dispersándose en el aire, además, se le añade un químico al gas para que se pueda oler cuando supera una condensación mínima. Otra medida de seguridad es la válvula de no retorno, para evitar incidentes cuando se llena el tanque. A parte de las medidas de seguridad que requiere el GNC/GLP el vehículo posee los sistemas que posee cualquier coche convencional: ABS, ESP, control de tracción...

- El **GNC y el GLP son más baratos** que los combustibles tradicionales, suponiendo un incentivo para el consumidor para la transformación del vehículo. El ahorro es de varios centenares de euros, dependiendo del uso que se haga del vehículo, y puede resultar muy atractivo para personas que su vehículo es su fuente de ingresos, como taxistas o transportistas.
- Las **transformaciones son baratas**. Los kits que se añaden al vehículo para transformarlo cuestan de media 2.000 €, un precio no muy elevado, además si se compara con el precio de un vehículo nuevo es muy pequeño. Dichas transformaciones pueden ser realizadas en gran número de lugares de España, siendo esto muy cómodo para los clientes
- **Subvenciones para los vehículos nuevos que usan combustibles gaseosos**. En el caso de que se quiera adquirir un vehículo nuevo que use combustible gaseoso, que es de media más de 2.000 € más caro que uno de combustible tradicional, las comunidades autónomas dan subvenciones, como la Comunidad de Madrid con el II Plan Mus que da 2.500 € por la compra de un vehículo que use GNC y 1.500 € a los que usan GLP. Además, el concesionario subvenciona 1.000 €.

INCONVENIENTES

- El vehículo sufre una **pérdida de potencia con el nuevo combustible**. Para calcular la potencia que produce un combustible es necesario fijarse en el poder calorífico inferior y los combustibles alternativos tienen un poder calorífico volumétrico inferior menor y por lo tanto una menor potencia. Esta pérdida puede compensarse aplicando mejoras al proceso de combustión, pero aún así es complicado obtener la misma potencia. Además, para obtener la mayor potencia es necesario que la mezcla sea estequiométrica ya que la gasolina utiliza este tipo de mezcla, aunque estos combustibles pueden funcionar bien con mezclas pobres por su capacidad de mezcla con el aire. La pérdida de potencia está entorno al 10 %, dependiendo del combustible y el ciclo de combustión del motor.
- El **reducido número de estaciones de repostaje** hace que la implantación de este tipo de combustible sea más lenta. Es especialmente complicado repostar GNC en España debido a que el número de estaciones no supera el centenar y por lo tanto en caso de querer realizar un gran trayecto será necesario vigilar la ubicación de las pocas estaciones. El número tan bajo de estaciones de GNC está principalmente relacionado con las complicaciones que conlleva el almacenaje de este combustible, requiriendo de numerosos sistemas para mantener la seguridad en el repostaje y del conjunto de

la estación. En el caso del GLP, al estar en estado líquido durante el repostaje hace que sea todos los procesos sean más fáciles y se pueda implantar en las estaciones tradicionales de gasolina y gasóleo, es por esto por lo que las grandes compañías de estaciones de repostaje están añadiendo este combustible, pudiendo ya repostar en un total de 659 estaciones en España, aunque este número se queda pequeño en comparación con las estaciones de gasolina y gasóleo. Para conseguir que se aumente el número de lugares donde repostar GNC/GLP se ha redactado regulaciones que especifican que cada 150 km tiene que haber una estación y de esta manera se espera un aumento del uso de este combustible.

- El **depósito de almacenamiento tiene que ser revisado** cada 4 años y ser sustituido cada 20 años, aunque la vida media de los vehículos en España no llega a ese gran número de años. Esta revisión se añadirá a la propia de cualquier vehículo.
- El **almacenamiento del GNC**, debido a que necesita estar en estado gaseoso hace que sea necesario instalar depósitos. Estos depósitos al estar el combustible en estado gaseoso requieren de un espacio mayor y por lo tanto en algunos casos será necesario hacer uso de parte del maletero para colocar depósitos. Además, lo normal si no se quiere perder mucho espacio en el vehículo es que no se puede igualar la autonomía a la del vehículo cuando usa gasolina.
- El uso de **sistemas de tratamientos de gases queda muy restringido**. Un claro ejemplo es con el catalizador de tres vías, un sistema muy común, que requiere de una temperatura mínima para realizar la conversión total de los hidrocarburos, esta temperatura es mayor en el caso del gas natural que la de la gasolina. Esto es un problema ya que la temperatura de los gases de escape de una combustión con GNC es menor que la gasolina. A esto hay que añadirle el efecto envejecimiento del catalizador que hace que con el tiempo vaya requiriendo de mayor temperatura para poder hacer la conversión de los hidrocarburos.

11. Referencias.

- [1] DGT-Parque de vehículos 2018 consultado el 2/06/2019: <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>
- [2] GASNAM y ASEPA: El gas natural en la movilidad. Madrid M-34272-2017
- [3] Gas Licuado consultado el 2/06/2019: <https://gaslicuado.org/autogas/>
- [4] Asociación Mundial del Gas Licuado de Petróleo (WLPGA) consultado 3/ 06/2019: <http://es.exceptionalenergy.com/>
- [5] The European LPG Association consultado el 4/06/2019: <http://www.aegpl.eu>
- [6] The Global Economy consultado el 5/06/2019: https://es.theglobaleconomy.com/rankings/lpg_consumption/
- [7] Index Mundi consultado el 5/06/2019: <https://www.indexmundi.com/map/?v=137&l=es>
- [8] Emisiones de los distintos combustibles: <https://www.espormadrid.es/2009/12/madrid-dispondra-de-la-mayor-red-de.html>
- [9] Manfred Grassbauer, Ecology and Sustainable development, TU Wien.
- [10] DGT: El tráfico que ruido produce y que daños causa: <http://revista.dgt.es/es/multimedia/infografia/2016/0517-Ruido-niveles-y-danos.shtml#.XTCRhS0rwWp>
- [11] REGLAMENTO (UE) No 540/2014 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 16 de abril de 2014: <https://www.boe.es/doue/2014/158/L00131-00195.pdf>
- [12] Dimensionado de un vehículo convencional para el empleo de gas natural comprimido como combustible, Álvaro Benavides, GASNAM: http://gasnam.es/wp-content/uploads/2016/11/VehiculoGNC_TFM-Benavides-Tinaut_27oct2016p.pdf
- [13] Precio de los combustibles en la gasolinera Repsol Santa Ana consultado el 18/Julio/2019 <https://www.dieselogasolina.com/Buscador/Ficha/14992>
- [14] Precio del GNC en Repsol Seseña consultado el 18/Julio/2019: https://www.komparing.com/es/gasolineras/gasolinera_repsol/sesena/gas-natural-comprimido/40.1051940918_-3.6463329792
- [15] Volkswagen Caddy 1.4 Bluemotion Trenline 110 CV ficha técnica: <https://www.motor.es/volkswagen/caddy/caddy/14-tgi-110cv-bluemotion-trendline-5269.html>
- [16] Volkswagen Caddy 1.9 TDI 104 CV ficha técnica: <https://www.arpem.com/furgonetas/volkswagen/caddy/modelos-08/volkswagen-caddy-life-19-d-104.html>
- [17] Instituto Nacional de Estadística, km en función de la ocupación y antigüedad del coche: <http://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t25/p500/2008/p10/10/&file=10020.px>
- [18] Transformación a GLP: <https://www.reparatucoche.com/l/transformacion-glp>

- [19] Puntos de repostaje de GNC consultado el 18/Julio/2019:
<https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-estaciones-de-gas-natural/>
- [20] Memoria de 2018 de AOP:
https://www.aop.es/wp-content/uploads/2019/05/aop_memoria_2018.pdf
- [21] Informe RACE: Autogas, una alternativa a carburantes tradicionales:
<https://gaslicuado.org/pdf/informe-seguridad-GLP-RACE.pdf>
- [22] Coches con GNC que se pueden comprar en España, consultado el 23/7/19
<https://www.autofacil.es/reportajes/2018/10/08/coches-gas-natural-puedes-comprar/46712.html>
- [23] Coches con GLP en España consultado el 23/7/19:
<https://cochesnuevos.autofacil.es/coches-glp.html>
- [24] Distintivo medio ambiental de la DGT:
<http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/distintivo-ambiental/>
- [25] Máquinas térmicas volumétricas, Termodinámica, ICAI.
- [26] Audi Q7 V12 Turboalimentado
https://www.libroazul.com/ebc_admin/catalogos/q72015.pdf
- [27] Prof. F. Payri y Prof. J. M. Desantes: Motores de Combustión alternativos, Universidad Politécnica de Valencia.
- [28] Sistemas de inyección:
<https://fierrosclasicos.com/que-es-la-inyeccion-de-combustible/>
- [29] Reglamento nº 110 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas: Componentes de vehículos que usan GNC del 30.06.2015.
<https://www.boe.es/doue/2015/166/L00001-00169.pdf>
- [30] Audi A4 Avant g-tron:
<https://www.audi.es/es/web/es/innovacion-audi/tecnologia/g-tron.html>
- [31] Estudio del sistema GLP como combustible alternativo de uso en vehículos automotrices, Mauricio Arturo Barrera Suárez, Universidad del Azuay
- [32] Ircongas: <https://www.ircongas.com/en-que-consiste-la-adaptacion/>
- [33] NGV1 receptacles:
<https://www.parker.com/Literature/Fluid%20Connectors%20Group/FCG%20Asia%20Pacific/EB/FM%20series%20catelog.pdf>
- [34] Gas Natural Vehicular:
<http://www.aficionadosalamecanica.net/gas-natural-comprimido.htm>
- [35] Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos, María Luisa Soria García-Ramos, Julio 2017.
- [36] Real Decreto 750/2010, de 4 de junio, por el que se regulan los procedimientos de homologación de los vehículos de motor.
<https://www.boe.es/buscar/pdf/2010/BOE-A-2010-9994-consolidado.pdf>
- [37] Reglamento nº 115 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa: Sistemas de adaptación específicos para GLP y GNC.

- [38] Manual de procedimiento de inspección de las estaciones I.T.V, enero de 2012, Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- [39] II Plan Mus para la adquisición de vehículos de la Comunidad de Madrid
<https://gasnam.es/ii-plan-mus-comunidad-de-madrid/>
- [40] Ficha técnica de coches: <https://www.motor.es/marcas/>
- [41] Autogas VM: <https://www.autogasvm.es/precios>