



MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DIMENSIONADO DE UN VEHÍCULO CONVENCIONAL PARA EL EMPLEO DE GAS NATURAL COMPRIMIDO COMO COMBUSTIBLE

Autor: D. Álvaro Benavides Brasil

Tutor: D. Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Valladolid, julio de 2016

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España

DIMENSIONADO DE UN VEHÍCULO CONVENCIONAL PARA EL EMPLEO DE GAS NATURAL COMPRIMIDO COMO COMBUSTIBLE

RESUMEN BREVE

El gas natural comprimido es una alternativa idónea a gasolina y diesel en el sector de la automoción, aunque todavía no cuenta con las infraestructuras suficientes para su uso masivo. El gas natural puede emplearse en motores de explosión adaptados para funcionar junto con gasolina o en motores dedicados, optimizados para uso exclusivo del gas natural. La conversión necesaria para adaptar un vehículo tradicional conlleva optimizar el motor y sustituir el depósito de combustible líquido por depósitos de almacenamiento para albergar el gas comprimido a 200 bar. Como resultado, se consigue un motor más silencioso, a causa de una mezcla más homogénea, con una reducción considerable de emisiones de CO₂ y gases y partículas contaminantes, aunque también con menor potencia. El vehículo ve reducida su autonomía inicial y el espacio útil del maletero, donde se alberga parte del gas natural, a cambio de emplear un combustible más económico y limpio.

CONVENTIONAL VEHICLE SIZING FOR USING COMPRESSED NATURAL GAS AS FUEL

SHORT ABSTRACT

Compressed natural gas is a suitable alternative to gasoline and diesel in automotive, although there isn't adequate infrastructure for widespread use. Natural gas can be used in spark ignition engines adapted for operation with gasoline or dedicated engines optimized for natural gas exclusive use. The conversion required to adapt a traditional vehicle involves optimization engine and replace the liquid fuel tank for storage tanks for the compressed natural gas at 200 bar. As a result, the engine is quieter, due to a more homogeneous mixture, with a considerable reduction of CO₂ emissions and polluting gases and particulates, but also with lower power. The vehicle has less range and less useful space in the trunk, where part of natural gas is stored, in exchange for a cheaper and cleaner fuel.

DIMENSIONADO DE UN VEHÍCULO CONVENCIONAL PARA EL EMPLEO DE GAS NATURAL COMPRIMIDO COMO COMBUSTIBLE

RESUMEN EJECUTIVO

El gas natural aparece como alternativa a gasolina y diesel en la automoción, estimulado por la continua disminución de reservas petrolíferas. El gas natural, mejor repartido, cuenta con reservas más duraderas y con la ventaja de un precio más económico, a causa de un menor sometimiento a impuestos de hidrocarburos. Sin embargo, su uso en automoción solo es masivo en algunos países, ya que la mayoría aún no cuenta con una red de estaciones de repostaje adecuada.

El gas natural, que cuenta con un excelente poder calorífico por unidad de masa (46.23MJ/kg), se ve perjudicado por su estado gaseoso en condiciones ambientales. Por ello, es necesario recurrir a un almacenamiento en estado líquido, a -162°C , o de forma comprimida, a 200 bar. Esta segunda opción, denominada gas natural comprimido o vehicular, es la de más frecuente implantación en vehículos turismos.

El gas natural comprimido puede emplearse en motores de encendido provocado, bien sea en una configuración bi-fuel, en la que puede funcionar también con gasolina, o en configuración monovalente, con un motor optimizado para las características del gas natural.

En una conversión desde un vehículo con motor de gasolina para empleo de gas natural de forma exclusiva, es necesario llevar a cabo una serie de modificaciones.

Por las características del gas natural, el motor otorga menos potencia (12.7% menos que en gasolina), pero permite realizar variaciones para optimizar su funcionamiento. Se puede aumentar la relación de compresión a causa del excelente comportamiento antidetonante del gas natural (130 octanos), de manera que aumente la presión efectiva y, por tanto, mejore el rendimiento. También permite avanzar el encendido, logrando mejorar la dispersión cíclica. Además, la formación de una mezcla más homogénea conduce a un comportamiento del motor con menos vibraciones y, consecuentemente, menor ruido y mayor durabilidad. El consumo de combustible es inferior al de gasolina, con un funcionamiento óptimo del motor a menor régimen de giro y mayores grados de carga. Esta reducción del régimen conlleva la necesidad de emplear una caja de cambios con menor reducción.

En lo referente a emisiones, el gas natural es un combustible muy limpio. Las emisiones de CO_2 se reducen en un 19.4% respecto a gasolina, y todas las emisiones contaminantes son también menores: entre un 60-80% menos de monóxido de carbono, entre un 50-80% menos de óxidos de nitrógeno y la práctica ausencia de emisiones de partículas contaminantes. Si el motor funciona con mezcla estequiométrica, el empleo del catalizador de tres vías es óptimo. Sin embargo, la menor temperatura de los gases de escape dificulta la conversión en el catalizador de los hidrocarburos sin quemar.

El principal punto negativo del gas natural aparece en el almacenamiento del combustible. Es necesario albergar un gran volumen si no quiere reducirse drásticamente la autonomía inicial del vehículo y emplear depósitos metálicos capaces de soportar las solicitaciones de la presión de almacenamiento. Además de emplear el espacio liberado por el depósito de gasolina, se requiere hacer uso de parte del maletero. Es necesario llegar a un compromiso entre autonomía y espacio de maletero utilizado, que conduce a una reducción de la autonomía inicial de un 21% y una pérdida de espacio útil de 99 L, (22% del volumen del maletero). La adición de seis depósitos de aluminio para albergar el gas natural comprimido a 200 bar, solo supone un aumento de 35 kg en la masa del vehículo, lo que no influye de manera importante en el consumo energético del vehículo.

Como conclusión, el gas natural en automoción presenta las ventajas de ser un combustible económico y limpio, con los inconvenientes de una leve pérdida de potencia, una reducción de autonomía y disponibilidad de menor espacio útil en el maletero.

CONVENTIONAL VEHICLE SIZING FOR USING COMPRESSED NATURAL GAS AS FUEL

EXECUTIVE ABSTRACT

Natural gas is an alternative to gasoline and diesel in the automotive industry, stimulated by the continued decline in oil reserves. Natural gas reserves are better distributed and more durable. It has the advantage of a lower price because of lower tax submission. However, its use in automotive is just massive in very few countries, because in others, there isn't an adequate network of refueling stations.

Natural gas, which has an excellent calorific power per mass (46.23MJ/kg), is impaired by its gaseous state at ambient conditions. Therefore, it is necessary to store it in liquid state at -162°C , or compressed to 200 bar. This second option, known as compressed or vehicular natural gas, is the most common implementation in passenger vehicles.

Compressed natural gas can be used in spark ignition engines, either in a bi-fuel configuration in operable also with gasoline, or monovalent configuration optimized for the characteristics of natural gas engine.

In a conversion from gasoline-powered vehicle for use natural gas exclusively, it is necessary to carry out a series of modifications.

By the characteristics of natural gas, the engine gives less power (12.7% less than gasoline), but allows variations to optimize its performance. It can increase the compression ratio because of excellent antiknock behavior of natural gas (130 octane), to increase the effective pressure and improve performance. It also allows the ignition advance, achieving improved cyclical dispersion. Furthermore, the formation of a homogeneous mixture leads to engine performance with less vibration and, consequently, less noise and durability. Fuel consumption is lower than gasoline, with optimum engine performance at lower revs and greater load. This rate reduction involves the need for a smaller reduction gearbox.

About polluting emissions, natural gas is a clean fuel. CO_2 emissions are reduced by 19.4% compared to gasoline, and all polluting emissions are also lower: 60-80% less carbon monoxide, 50-80% less nitrogen oxides and the absence of particulate pollutants. If the engine runs stoichiometric mixture, the use of three-way catalyst is optimal. However, the lower temperature of the exhaust gases hinders catalytic conversion of unburned hydrocarbons.

The main negative point of natural gas is the fuel storage. It's necessary to accommodate a large volume in order not to reduce initial range of the vehicle and using metal deposits capable of withstanding the stresses of storage pressure. In addition to using the space freed up by the gas tank, it is required to use part of the trunk. It is necessary to reach a compromise between autonomy and trunk space used, which leads to a reduction of the initial range of 21% and a loss of usable space of 99 L, (22% of the volume of the trunk). The addition of six aluminum tanks to accommodate compressed natural gas at 200 bar, only means an increase of 35 kg in the vehicle mass, which does not influence significantly the energy consumption of the vehicle.

In conclusion, the automotive natural gas has the advantages of being an economical and clean fuel, with the disadvantages of a slight power loss, reduced range and less usable space in the trunk.

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que me han acompañado y apoyado en esta nueva aventura académica cuya finalización sólo supone otro punto y seguido en mi formación.

A mi tutor en este trabajo, Francisco Tinaut, por su inestimable ayuda y conocimiento.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes y justificación del TFM.....	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Alcance y desarrollo del TFM.....	2
2	SITUACIÓN ACTUAL DEL GAS NATURAL.....	3
2.1	Interés del gas natural en la automoción	3
2.2	Vehículos alimentados con gas natural.....	5
2.3	Infraestructura de repostaje	7
2.4	Estrategias para el impulso del gas natural	8
3	DESARROLLO DE LA CONVERSIÓN DE UN VEHÍCULO PARA SU USO CON GAS NATURAL COMPRESIONADO	9
3.1	Adaptación del vehículo	9
3.1.1	Vehículo inicial	9
3.1.2	Conversión del vehículo.....	10
3.2	Adaptación del motor	11
3.2.1	Motor inicial.....	11
3.2.2	Nueva configuración del motor.....	12
3.3	Descripción de los elementos del sistema	22
3.3.1	Elementos del sistema de almacenamiento	22
3.3.2	Alimentación del combustible.....	24
3.3.3	Sistema de Control.....	26
3.4	Equipamiento de repostaje	27
3.5	Emisiones de CO ₂	28
3.6	Otras emisiones contaminantes.....	31
3.7	Seguridad.....	34
3.8	Normativa.....	36
3.9	Aspectos económicos	38
4	CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL	41
4.1	Autonomía.....	42
4.2	Almacenamiento de gas natural comprimido	46
4.2.1	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS DEPÓSITOS.....	48
4.2.2	CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES Y LA MASA DEL DEPÓSITO	50
4.3	Análisis de los resultados.....	59
5	CONCLUSIONES.....	61
5.1	Conclusiones generales y específicas	61
5.2	Principales aportaciones del autor del TFM	63
5.3	Sugerencias para trabajos futuros	63

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXOS.....	67

Diagrama 1. Estructura de procesos para vehículos impulsados por gas natural [Basshuysen, 2016] .	12
Diagrama 2. Esquema del sistema de control de un motor bi-fuel gasolina-GNC [Basshuysen, 2016] .	26
Diagrama 3. Factor de compresibilidad de gases naturales en función de presión y temperatura pseudoreducidas [Standing-Katz, 1942]	45

Gráfico 1. Evolución del consumo de energía primaria por fuente en el marco de las nuevas políticas energéticas [IEA - WEO, 2013]	3
Gráfico 2. Mix de combustible en transporte por carretera en el marco de las nuevas políticas energéticas [IEA - WEO, 2013]	3
Gráfico 3. Potencia y par motor Energy TCe 90 [Renault Powertrain]	11
Gráfico 4. Área operacional del proceso de combustión de gas natural para mezcla pobre [Basshuysen, 2016].....	12
Gráfico 5. Parámetros del combustible para gasolina y gas natural [Basshuysen, 2016]	16
Gráfico 6. Comparación a plena carga: monovalente(GN), gasolina(RO95) y bi-fuel [Basshuysen, 2016].....	17
Gráfico 7. Velocidad de combustión laminar para metano y gasolina según Gülder y Haywood para condiciones de referencia (298K y 1 atm) [Basshuysen,2016]	17
Gráfico 8. Dispersión en la presión media efectiva para distintos porcentajes de H2 añadidos (porcentaje por volumen en el gas natural) [Korakianitis, 2009].....	18
Gráfico 9. Consumo específico de combustible del motor Mercedes-Benz 2.0 L "M274 NG" [Basshuysen,2016]	20
Gráfico 10. Nivel del espectro de ruido a 1m de distancia para motores diesel y de gas natural [Basshuysen, 2016].....	21
Gráfico 11. Ventana operacional para un motor GNC con catalizador de tres vías [Basshuysen, 2016]	32
Gráfico 12. Conversión catalítica de emisiones de hidrocarburos [HC] para gasolina y GNC [Basshuysen, 2016].....	32
Gráfico 13. Efecto del envejecimiento en la temperatura necesaria para la conversión del metano [Basshuysen, 2016].....	32
Gráfico 14. Emisiones de partículas para el motor "Mercedes Benz M270/274 a GN" en el NEDC [Basshuysen, 2016].....	33
Gráfico 15. Trade-off partículas-NOx [IVT, TU Graz]	33
Gráfico 16. Eficiencia de conversión para varias mezclas GN-H2 y ratios de EGR [Korakianitis, 2010]	33
Gráfico 17. Evolución del factor de compresibilidad con la presión para CH4 y H2 [Basshuysen, 2016]	45
Gráfico 18. Evolución de la masa del depósito en función de las condiciones.....	52
Gráfico 19. Evolución del diámetro interior del depósito en función de las condiciones	52
Gráfico 20. Comparativa de la masa del depósito para acero y aluminio	53
Gráfico 21. Comparativa del espesor de la pared del depósito para acero y aluminio	54
Gráfico 22. Porcentaje que supone la masa del combustible respecto a la masa total del sistema de almacenamiento, según el número de depósitos, para acero y aluminio	54
Gráfico 23. Evolución del D_{int} con el número de depósitos (Al).....	55
Gráfico 24. Evolución del volumen circunscrito y la masa del conjunto de depósitos en función de su número.....	55
Gráfico 25. Poder calorífico por unidad de masa total del almacenamiento ($m_{combustible}+m_{depósito}$)	56

Ilustración 1. Reservas de gas natural probadas en billones de metros cúbicos [Datos: CIA World Factbook, 2013]	4
Ilustración 2. Top 10 de países con mayor número de vehículos propulsados por gas natural [Datos: NGVA Europe, 2013]	5
Ilustración 3. Vehículos del catálogo actual que incorporan GNC [NGVA, 2016].....	6
Ilustración 4. Mapa con las estaciones de suministro de GNC en España [GASNAM, 2016]	7
Ilustración 5. Mapa de la península Ibérica con la propuesta establecida por GASNAM para la construcción de estaciones GNC/GNL [GASNAM, 2015]	8
Ilustración 6. Dimensiones principales del vehículo Renault Captur	9
Ilustración 7. Funcionamiento del motor de un vehículo Toyota híbrido con ciclo Atkinson	19
Ilustración 8. Componentes del sistema de almacenamiento de gas natural comprimido [Basshuysen,2016]	22
Ilustración 9. Elementos principales del sistema de almacenamiento de GNC.....	22
Ilustración 10. Elementos del sistema en un vehículo bi-fuel [Basshuysen, 2016].....	23
Ilustración 11. Esquema del sistema de alimentación de GNC del Volkswagen Golf Bi-Fuel	24
Ilustración 12. Sistema de encendido por chispa para vehículos de gas natural [Bosch, 2015]	24
Ilustración 13. Inyección directa a baja presión [Delphi]	25
Ilustración 14. Inyección central del gas (izquierda) e inyección multipunto (derecha) [Basshuysen]....	25
Ilustración 15. Inyector multipunto de gas natural [Bosch]	25
Ilustración 16. Sistema de inyección de combustible de un motor bi-fuel gasolina-GNC [Basshuysen]	26
Ilustración 17. Manguera de llenado de GNC según el estándar NGV1	27
Ilustración 18. Sistema de carga de GNC [Gas Natural Fenosa, 2016]	27
Ilustración 19. Comparativa de los costes de producción y transporte entre gas natural y gasolina, para un escenario actual (izquierda) y un futuro escenario maduro (derecha) [International Energy Agency, 2013].....	30
Ilustración 20. Vehículo sin ocupantes accidentado, sin daños en los depósitos de almacenamiento de gas natural comprimido [Basshuysen, 2016]	34
Ilustración 21. Impacto frontal offset 40% contra barrera deformable (izquierda) e impacto lateral de barrera deformable (derecha)	35
Ilustración 22. Vista principal del vehículo cortado transversalmente, donde se aprecian los espacios bajo el piso y en el doble fondo del maletero	47
Ilustración 23. Planta principal del vehículo donde se aprecian los espacios bajo el piso y en el doble fondo del maletero	47
Ilustración 24. Dimensiones de los depósitos de almacenamiento	48
Ilustración 25. Distribución de la presión en el interior del cilindro	48
Ilustración 26. Cilindro cortado a la mitad. La componente vertical de la presión se anula por simetría, quedando la resultante aplicada perpendicularmente al diámetro interior del depósito	49
Ilustración 27. Distribución de la presión en la semiesfera y reacción del material.....	49
Ilustración 28. Maletero del Renault Captur con el doble fondo disponible para albergar depósitos	55
Ilustración 29. Disposición final de los depósitos de gas natural comprimido	59
Ilustración 30. Prestaciones finales de autonomía, volumen de maletero y masa del almacenamiento de combustible.....	60

Tabla 1. Poder calorífico de distintos combustibles por unidad de masa y de volumen (Datos: JRA Technical Reports, 2014)	4
Tabla 2. Número de estaciones de servicio de gas natural comprimido en Europa [NGVA EU,2015].....	7
Tabla 3. Especificaciones principales motor TCe 90 CV [Renault Powertrain]	11
Tabla 4. Composición de gas natural que se empleará en el presente estudio (izquierda) y composición simplificada para cálculo del dosado estequiométrico (derecha)	14
Tabla 5. Composición y PCI del gas natural empleado.....	14
Tabla 6. Propiedades de los combustibles.....	15

Tabla 7. Relaciones de engranajes para la caja de cambios JH3 para sus variantes gasolina y diesel [Renault Powertrain].....	21
Tabla 8. Moles de C, H, CO ₂ y N ₂ en la composición del combustible.....	29
Tabla 9. Valores límite de la norma EURO 6 para motores MEP (PI) y MEC (CI) [BASMA].....	37
Tabla 10. Impuesto de matriculación según emisiones de CO ₂	38
Tabla 11. Datos de inversión y amortización para un vehículo en sus modelos de gasolina y GNC	39
Tabla 12. Comparativa de la amortización, coste de combustible y coste de mantenimiento para los modelos de gasolina y GNC	40
Tabla 13. Cálculo de las propiedades pseudocríticas del gas natural.....	44
Tabla 14. Comparativa de la influencia de la presión en el Dint y la masa de los depósitos	53
Tabla 15. Dimensiones máximas disponibles	56
Tabla 16. Dimensiones de los depósitos de aluminio	57
Tabla 17. Dimensiones de los depósitos de aluminio para un 80% de combustible	57

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación del TFM

La automoción es un sector en constante desarrollo y evolución, fruto de grandes inversiones e investigaciones en la búsqueda de desarrollos punteros que sitúen a las marcas en puestos privilegiados dentro del competitivo mercado.

En el marco del combustible, con los hidrocarburos líquidos tradicionales, gasóleo y gasolina, en su cénit de desarrollo, las investigaciones se han apartado buscando la incursión de nuevas formas de energía para producir la propulsión de los vehículos. La permanente duda sobre el agotamiento de los combustibles fósiles no renovables, unidos a la cada vez más creciente concienciación por parte de la sociedad sobre las emisiones de contaminantes y de CO₂ y el endurecimiento de los estamentos reguladores, conduce a la búsqueda de nuevas alternativas.

Mientras que algunas energías limpias, como la pila de combustible o la electricidad, se encuentran aún un paso atrás a causa de las limitaciones tecnológicas actuales, existen otras alternativas, que si bien no están destinadas a ser la energía limpia del futuro, bien pueden enriquecer el parque mundial de vehículos con opciones más ecológicas.

La **motivación** por elaborar el presente estudio radica en el **interés** generado por las **transformaciones que tendría que sufrir un vehículo actual** para presentarse en el mercado como una alternativa de mejor aprovechamiento de las fuentes de energía, que eviten la sobreexplotación de los combustibles derivados del petróleo.

Este interés surge fundamentalmente de las posibles variaciones en la carrocería de un vehículo, asunto objeto de las prácticas en empresa realizadas en el *Máster en Ingeniería de Automoción*. Estas modificaciones son frecuentes para adaptarse y albergar una nueva configuración de los depósitos de combustible, aunque finalmente se ha optado por mantener al máximo la naturaleza inicial del vehículo, entendiendo el estudio como una posible adaptación de un vehículo ya desarrollado.

1.2 Objetivos

Principal

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster es el dimensionado y evaluación de las características de un vehículo con Gas Natural Comprimido (GNC), empleando la arquitectura de un vehículo gasolina convencional. Se estudiarán las modificaciones necesarias para la adaptación del vehículo y el motor de encendido provocado.

Específicos

Los siguientes objetivos responden a los puntos complementarios en el desarrollo del TFM y que confluirán en el resultado final que dará respuesta al objetivo principal.

Análisis de las prestaciones

- Análisis de las prestaciones del vehículo en comparación con el vehículo original.
- Potencia.
Cálculo y análisis de prestaciones en términos de potencia.
Cuantificación de la reducción de potencia respecto al gasolina.
- Transmisión.
Cálculo y análisis del régimen. Modificación de la caja de cambios.
- Autonomía
Dimensionado de los depósitos de almacenaje de GNC para que el vehículo conserve su autonomía original. De no ser viable por su tamaño o peso, se le asignarán unos límites adecuados, a partir de los cuales se calculará su autonomía.

Depósito de almacenamiento

Análisis del tamaño, forma y disposición idóneos para los depósitos de almacenamiento del GNC en función de la autonomía y las limitaciones de tamaño y peso. Se estudiará:

- Presión de almacenamiento, diámetro y espesor del depósito. Evaluación de la solución óptima en función del número y tamaño de los depósitos.
- Alojamiento de las bombonas.
- Conductos repostaje-depósito-alimentación. Valvulería.

Descripción de los elementos principales del sistema

Descripción de los elementos que componen el circuito de almacenamiento de combustible, alimentación al depósito y alimentación del combustible a la cámara de combustión, de acuerdo a la norma de referencia.

Emisiones y medio ambiente

Para el nuevo combustible, se calcularán de forma directa las emisiones de CO₂ en funcionamiento, la huella de carbono originada por el combustible según valores estándar de rendimiento de transporte y transformación; y de igual modo, valores estándar de emisiones contaminantes. Normativa en términos de control de emisiones y comparación con vehículos con hidrocarburos líquidos tradicionales. Equipos de reducción de contaminantes.

Aspectos económicos

Inversión en la conversión y diferencia de coste del combustible. Subvenciones.

Equipamientos de repostaje

Descripción de los medios empleados en el repostaje de GNC. Normativa de repostaje. Composición estándar del Gas Natural suministrado por la red nacional. Instalaciones. Situación en España. Subvenciones.

Seguridad

Normativa vigente en materia de seguridad: Zonas de especial afectación, normas de impacto, incendio. Seguridad en el repostaje, impactos, posibles fugas.

1.3 Alcance y desarrollo del TFM

Se pretende, con el presente TFM detallar el proceso de adaptación de un vehículo convencional MEP para el uso de gas natural comprimido o gas natural vehicular (GNC o GNV) como combustible, haciendo especial hincapié en el dimensionado del depósito de almacenamiento. Se partirá de un vehículo conocido en el que se buscará mantener las prestaciones técnicas y del supuesto de un motor ya adaptado en su configuración para funcionar con el nuevo combustible.

Se buscará de igual modo describir la normativa a la que se ven sometidos los vehículos con empleo de GNC en materia de seguridad, instalaciones de servicio y emisiones contaminantes; así como estudiar desde el punto de vista económico la incidencia de la adaptación en cuanto a inversiones y rentabilidad.

Se explicará la situación actual del combustible, así como el estado del parque de vehículos e infraestructura en España y el futuro desarrollo previsto para años venideros.

El desarrollo de la propuesta se realizará describiendo los elementos del sistema de almacenamiento, estudiando los aspectos clave en materia de emisiones, medio ambiente y seguridad y calculando las necesidades de almacenamiento en función de las propiedades del gas y las prestaciones a otorgar al vehículo.

Se concluirá, finalmente, analizando los aspectos que se mantienen, mejoran o empeoran como resultado de la adaptación del vehículo al nuevo combustible.

2 SITUACIÓN ACTUAL DEL GAS NATURAL

2.1 Interés del gas natural en la automoción

El gas natural es un hidrocarburo compuesto principalmente por metano (CH₄) y menores proporciones de etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) y otros hidrocarburos ligeros.

Se trata de un combustible en auge que, a medio-largo plazo, puede suponer una alternativa real a gasóleo y gasolina en el ámbito de la automoción.

El gas natural, desde el punto de vista medioambiental, cuenta con una ventaja fundamental respecto a los combustibles líquidos tradicionales: el menor porcentaje de carbono en su composición se traduce en una menor emisión de CO₂ a causa del proceso de combustión. También son mucho menores las emisiones contaminantes fruto de la combustión.

Todo ello, unido a las constantemente decrecientes reservas de petróleo, conduce a que las políticas energéticas internacionales fijen su atención en el gas natural junto con las energías renovables. En este marco, se espera un incremento progresivo en el consumo de gas natural y energías procedentes de fuentes renovables, en detrimento de los derivados del petróleo (Gráfico 1).

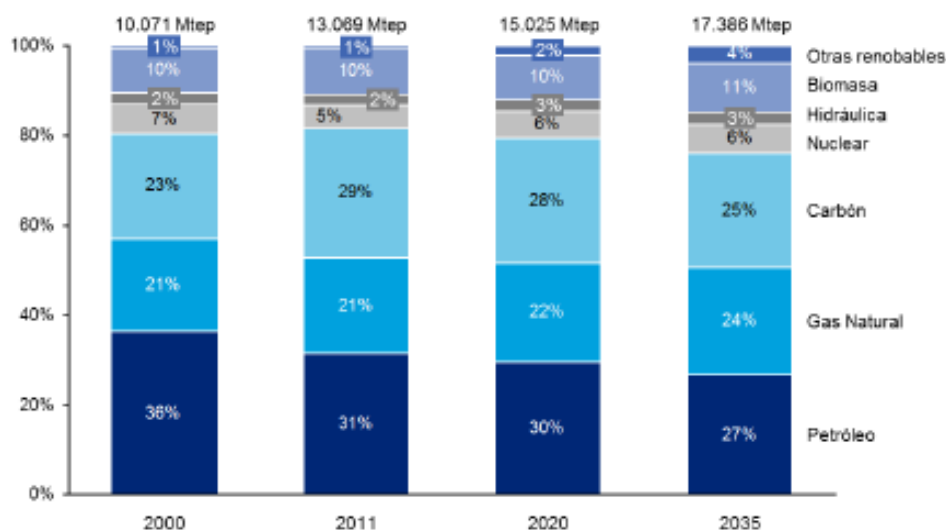


Gráfico 1. Evolución del consumo de energía primaria por fuente en el marco de las nuevas políticas energéticas [IEA - WEO, 2013]

En ese mismo escenario gana peso el empleo del gas natural en el sector de la automoción, hasta alcanzar un 5% del MIX de combustible en transporte por carretera para el año 2035 (Gráfico 2).

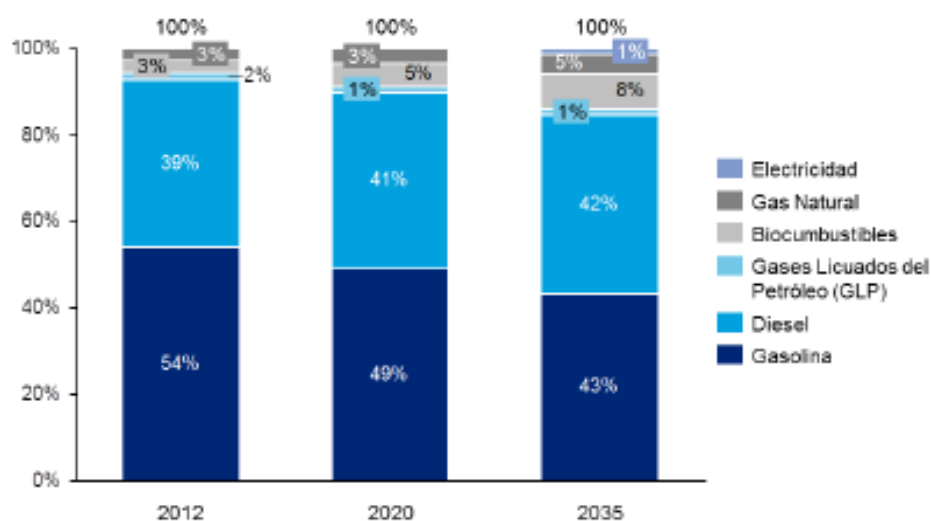


Gráfico 2. Mix de combustible en transporte por carretera en el marco de las nuevas políticas energéticas [IEA - WEO, 2013]

Una de las grandes ventajas del gas natural, es que se encuentra distribuido por todo el mundo en yacimientos libres o junto a yacimientos fósiles de petróleo o carbón. Además, destaca la existencia de reservas mucho más duraderas que el petróleo fósil, unido a la posibilidad de generación de forma natural (biogás). Según datos de la CIA World Factbook en 2013, las reservas probadas de gas natural en el mundo no han hecho más que crecer, situándose en 187,3 billones de metros cúbicos. Según datos de la misma agencia, el consumo anual en el mundo supera los 3,2 billones de metros cúbicos, lo que garantizaría poder mantener la producción durante casi 60 años más (Ilustración 1).

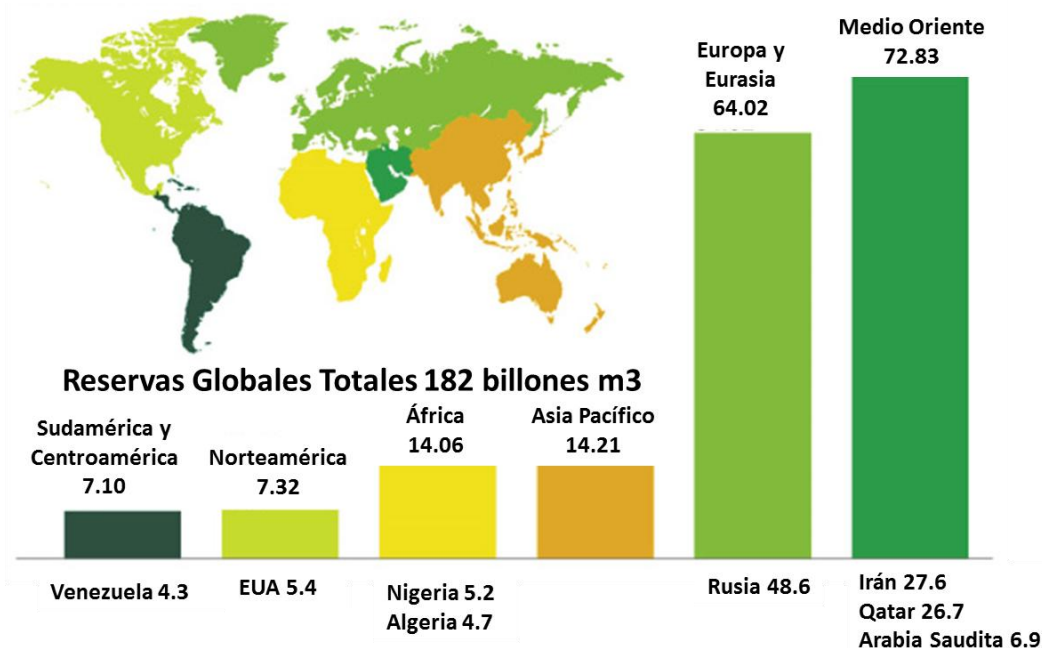


Ilustración 1. Reservas de gas natural probadas en billones de metros cúbicos [Datos: CIA World Factbook, 2013]

Entre las propiedades del gas natural como combustible destaca su poder calorífico. Mientras que su poder calorífico por unidad de masa es superior al de gasolina y gasóleo, sufre el impedimento de su estado gaseoso en condiciones ambientales, que le concede un menor poder calorífico por unidad de volumen (Tabla 1).

Combustible	PCI (MJ/kg)	PCI (MJ/Nm ³)
Metano	50,0	35,7
Gas natural (EU-mix)	45,1	35,7
Gas natural (Rusia)	49,2	35,8
Hidrógeno	120,1	10,7
Gasóleo	43,1	35.900
Gasolina	43,2	32.200

Tabla 1. Poder calorífico de distintos combustibles por unidad de masa y de volumen (Datos: JRA Technical Reports, 2014)

El bajo poder calorífico por unidad de volumen del gas natural es el principal inconveniente para su empleo en automoción. Para poder almacenarse a bordo del vehículo, hay que recurrir a comprimir el gas, o bien a reducir su temperatura hasta alcanzar el estado líquido.

De las dos soluciones, el gas natural comprimido (GNC) conlleva al uso de instalaciones de alta presión (200 bar), mientras que el gas natural líquido (GNL) requiere disminuir la temperatura de almacenaje hasta -162°C. En el caso del gas natural licuado, se necesita además regasificar el combustible para poder introducirse en el motor.

El GNL ha ganado importancia en los últimos años en el transporte pesado, mientras que el GNC, por sus condiciones de almacenamiento, se adapta más a su empleo en vehículos turismo.

Aunque ambas situaciones suponen, en primera aproximación, un inconveniente importante a la hora de efectuar el almacenaje en el vehículo, se ven compensadas por las ventajas que ofrece: se trata de un combustible muy económico, presenta un balance de emisiones muy favorable respecto a

los combustibles tradicionales, es más silencioso y puede emplearse en los motores actuales efectuando ligeras modificación.

Las características del gas natural, como su alto índice de octano (130, superior a la gasolina) dificulta en gran medida su encendido por compresión, por lo que se opta habitualmente por emplear motores de explosión (ciclo OTTO), con encendido provocado por bujías.

El proceso de combustión es muy similar al de un motor de gasolina, sin embargo, se requieren diversas adaptaciones para optimizar el proceso, tanto en el caso de emplear únicamente gas natural o indistintamente gas natural y gasolina.

Una de las adaptaciones fundamentales que tiene que sufrir el vehículo es la de los depósitos de almacenamiento, sustituyendo un depósito que alberga un combustible líquido a presión atmosférica por uno que alberga gas a alta presión, además del consecuente aumento de volumen.

2.2 Vehículos alimentados con gas natural

A día de hoy, el gas natural es la principal alternativa a los derivados del petróleo en automoción. Aunque se trata de un combustible en claro auge en el sector, muchos países aún no acaban de apostar por él. España apenas cuenta con un parque de 5000 vehículos de gas natural, la mayoría de los cuales son vehículos pesados y de uso intensivo; mientras que en países como Argentina o Italia, se trata de una opción de uso masivo.

Actualmente, el parque mundial de automóviles propulsados por gas natural (entre GNC y GNL) se sitúa en más de 20 millones [GASNAM, 2016].

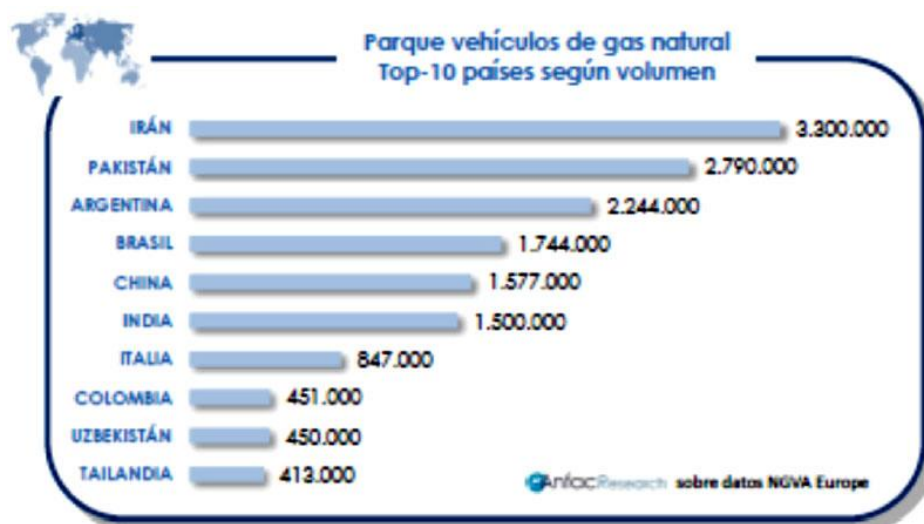


Ilustración 2. Top 10 de países con mayor número de vehículos propulsados por gas natural [Datos: NGVA Europe, 2013]

En España, el uso del gas natural sigue siendo una alternativa denostada, aunque se prevé un gran crecimiento en los próximos años, con una estimación para 2025 de 4000 vehículos de gas natural licuado y 36000 de gas natural comprimido [GASNAM].

La gama de vehículos impulsados por gas natural que ofertan las marcas de automóviles cada vez es más amplia. Centrando la atención en alternativas de gas natural comprimido, el más empleado para vehículos turismo, se encuentran fundamentalmente tres vertientes: bi-fuel, dual-fuel y monovalente:

Los vehículos monovalentes o dedicados son los que emplean gas natural como único combustible. Utilizan motores de encendido provocados optimizados para el gas natural, con un elevado rendimiento y bajas emisiones contaminantes. Estos dos aspectos se logran con la optimización del motor, con una mayor relación de compresión y un menor peso arrastrado, que permite suministrar mayores potencias y con la mayor temperatura del catalizador, que facilita la oxidación del metano.

Los vehículos bi-fuel o bivalentes son los que operan con gas natural o gasolina, indistintamente. Emplean motores de encendido provocado, con la relación de compresión marcada por la gasolina y cuentan con dos depósitos para cada uno de los combustibles, con sistemas de alimentación diferenciados y con la posibilidad de seleccionar el combustible durante la conducción. Presentan la ventaja de una elevada autonomía, asociada a la seguridad de contar con un combustible tradicional como es la gasolina. Se trata además de la primera vía de acercamiento de los principales fabricantes de automóviles al sector del gas natural.

Existe una variante intermedia entre monovalente y bi-fuel, denominada cuasi monovalente, en el que el depósito de gasolina almacena en torno al 15% de la masa de gas natural. El motor mantiene del mismo modo la compatibilidad con ambos combustibles.

Existen vehículos tri-fuel, que además de gas natural y gasolina presentan la flexibilidad del empleo de etanol, individualmente o como mezcla con la gasolina.

Los vehículos dual-fuel utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo en motores de encendido por compresión. El gas natural se introduce mediante un carburador o un sistema de inyección en el aire de admisión y el gasóleo se inyecta directamente en la cámara. Normalmente, el gasóleo solo se emplea en el arranque del motor, siendo el funcionamiento habitual con gas natural (hasta un 90% del combustible total). Existe una variante desarrollada en Canadá para vehículos pesados, con inyección directa de ambos combustibles a alta presión (HPDI), directamente en la cámara de combustión. El gasóleo, responsable del inicio de la combustión por efecto de la compresión, se introduce en pequeñas cantidades.

Por último, existe también una vertiente en la que se hará especial hincapié en próximos apartados por las oportunidades que ofrece, que consiste en el empleo de mezclas de gas natural e hidrógeno en un porcentaje de 4-9% (HCNG). Las estaciones de servicio de este combustible limitan su presencia a países como Noruega y Canadá.









Audi	Fiat	Mercedes-Benz	Seat
Audi A3 Sportback g-tron	Fiat Punto Natural Power	Mercedes-Benz E-Class E 200 NGD	Seat Leon TGI
			
Max. output, kW (hp) 81 (110)	Max. output, kW (hp) 51 (70)	Max. output, kW (hp) 115 (156)	Max. output, kW (hp) 81 (110)
Fuel tank, CNG (petrol) 14,4 kg (50 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 13 kg (45 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 20 kg (80 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 15 kg (50 lt.)
Fuel consumption per 100 km. 3,3 kg	Fuel consumption per 100 km. 4,2 kg	Fuel consumption per 100 km. 4,3 kg	Fuel consumption per 100 km. 3,5 kg
Range, CNG (petrol) 420 km (960 km)	Range, CNG (petrol) 310 km (715 km)	Range, CNG (petrol) 400 km (1200 km)	Range, CNG (petrol) 420 km (940 km)
Fuel costs per 100 km 3,63 €	Fuel costs per 100 km 4,62 €	Fuel costs per 100 km 4,73 €	Fuel costs per 100 km 3,85 €
CO2 emission 88-92 g/km	CO2 emission 115 g/km	CO2 emission 116 g/km	CO2 emission 94 g/km
Basic price Germany (incl. VAT) 26.450 €	Basic price Italy (incl. VAT) 16.100 €	Basic price Germany (incl. VAT) 48.314,00 €	Basic price Spain (incl. VAT) 21.390 €
Lancia	Škoda	Volkswagen	Volvo
Lancia Ypsilon Ecochic CNG	Škoda Octavia Limusine G-TEC	Volkswagen Golf TGI	Volvo V70 Bi-fuel (delayed OEM)
			
Max. output, kW (hp) 59 (80)	Max. output, kW (hp) 81 (110)	Max. output, kW (hp) 81 (110)	Max. output, kW (hp) 180 (245)
Fuel tank, CNG (petrol) 12 kg (35 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 15 kg (50 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 15 kg (50 lt.)	Fuel tank, CNG (petrol) 18 kg (70 lt.)
Fuel consumption per 100 km. 3,1 kg	Fuel consumption per 100 km. 3,5 kg	Fuel consumption per 100 km. 3,4 kg	Fuel consumption per 100 km. 4,5 kg
Range, CNG (petrol) 350 km (760 km)	Range, CNG (petrol) 420 km (940 km)	Range, CNG (petrol) 400 km (940 km)	Range, CNG (petrol) 400 km (1.095)
Fuel costs per 100 km 3,41 €	Fuel costs per 100 km 3,85 €	Fuel costs per 100 km 3,85 €	Fuel costs per 100 km 4,95 €
CO2 emission 86 g/km	CO2 emission 94 g/km	CO2 emission 92-94 g/km	CO2 emission 121 g/km
Basic price Italy (incl. VAT) 16.650 €	Basic price Germany (incl. VAT) 21.790 €	Basic price Germany (incl. VAT) 23.825 €	Basic price Sweden (incl. VAT) 38.707 €

Ilustración 3. Vehículos del catálogo actual que incorporan GNC [NGVA, 2016]

2.3 Infraestructura de repostaje

Uno de los males de los que adolece el gas natural orientado al vehículo en España, es de las escasas estaciones de repostaje repartidas por su geografía. A fecha de junio de 2016, España cuenta únicamente con 42 estaciones de suministro de gas natural vehicular (Ilustración 4).



Ilustración 4. Mapa con las estaciones de suministro de GNC en España [GASNAM, 2016]

Este dato sitúa a España muy por debajo de países europeos como Alemania o Italia (Tabla 2). Las estaciones se concentran en grandes núcleos urbanos, aunque apenas hay estaciones dispuestas en rutas importantes dentro del tránsito peninsular.

En el caso de las estaciones que suministran gas natural líquido, destaca que todas son capaces de surtir también GNC. En el capítulo 3 del presente trabajo, se hará una descripción de los elementos y el funcionamiento de una estación de repostaje de gas natural comprimido.














		
	Austria	175
	Belgium	26
	Bulgaria	109
	Czech Republic	85
	France	40
	Germany	851
	Italy	1071
	Netherlands	150
	Spain	36
	Sweden	161
	Switzerland	136
	U.K.	2

Tabla 2. Número de estaciones de servicio de gas natural comprimido en Europa [NGVA Europa, 2015]

2.4 Estrategias para el impulso del gas natural

La falta de una adecuada infraestructura de repostaje, junto con la incertidumbre en la evolución de la regulación y la limitada oferta de vehículos son las principales barreras al uso del GNC.

Por ello, está en marcha un plan para el desarrollo de las estaciones de suministro de GNC y GNL, que los gobiernos deberán implementar como respuesta a la Directiva Europea de Infraestructuras de Combustibles, así como un impulso al uso de combustibles alternativos.

La Directiva 2014/94/UE relativa a la implantación de infraestructuras para combustibles alternativos, recoge las pautas para asegurar un adecuado suministro de combustibles alternativos.

La Directiva propone varias consideraciones para la instalación de la red de suministro de gas natural como combustible alternativo: Asegurar el suministro en aglomeraciones urbanas para garantizar el suministro de GNC a vehículos privados o el suministro de GNC en las rutas TEN-T, sugiriendo unas distancias máximas entre estaciones de 150 km.

En referencia a la Directiva, GASNAM (Asociación Ibérica de Gas Natural para Movilidad) realiza una propuesta para establecer un plan de estaciones de GNC en núcleos urbanos, en todas las capitales de provincia y similares y un plan de estaciones de GNC en rutas TEN-T, con un total de 141 estaciones a construir (Ilustración 5).



Ilustración 5. Mapa de la península Ibérica con la propuesta establecida por GASNAM para la construcción de estaciones GNC/GNL [GASNAM, 2015]

La Estrategia para el Impulso de Vehículos con Energías Alternativas se estructura en cuatro ejes de actuación relacionados: la **Industrialización**, el **Mercado**, la **Infraestructura** y el **Marco Regulatorio**.

Se busca: asegurar la estabilidad normativa, la calidad y la seguridad de la tecnología para dar garantías al Mercado, a los inversores en Infraestructura e impulsores de la Industrialización; impulsar la Industrialización de vehículos con energías alternativas; crear una red de Infraestructura que cubra las necesidades de los usuarios y permita el desarrollo de un Mercado de vehículos con energías alternativas; e introducir acciones de impulso de la demanda hasta conseguir un Mercado que impulse las economías de escala y la oferta, consolidando la Infraestructura y la Industrialización.

Con una actuación en esta línea, la Estrategia del Marco Europeo para el impulso de combustibles alternativos estima que el parque de vehículos de GNC alcanzará los 50000 en el año 2025.

3 DESARROLLO DE LA CONVERSIÓN DE UN VEHÍCULO PARA SU USO CON GAS NATURAL COMPRIMIDO

3.1 Adaptación del vehículo

Se describirá a continuación el vehículo de partida y las principales modificaciones asociadas a la conversión en lo que se refiere a la configuración del vehículo.

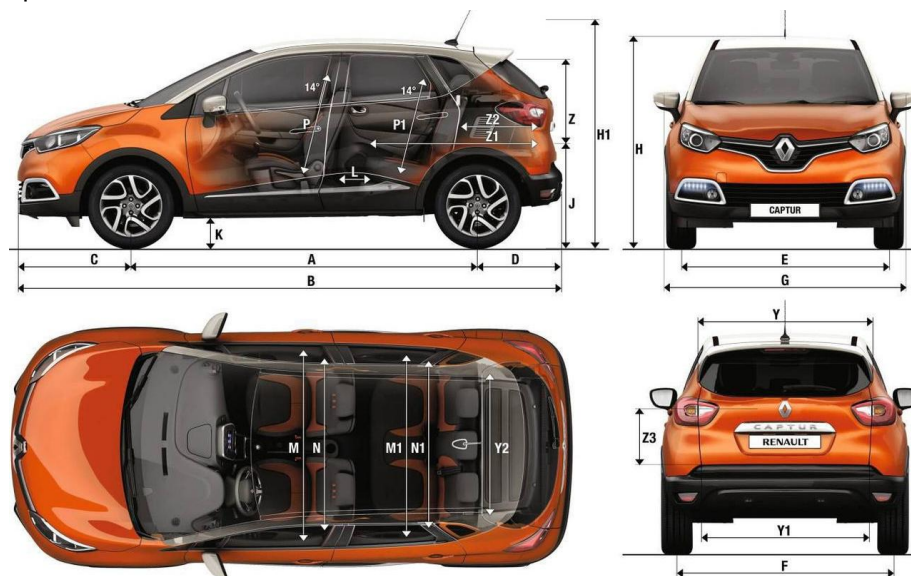
3.1.1 Vehículo inicial

El vehículo que se ha escogido para la adaptación al uso de gas natural comprimido es el **Renault Captur TCe 90 CV**. Se trata de un modelo de gasolina, con un motor que puede adaptarse al uso de gas natural.

Renault Captur es un vehículo compacto, fundamentalmente urbano, aunque con naturaleza de SUV. Uno de los factores más determinantes para realizar la conversión es el espacio para albergar los depósitos de combustible. La naturaleza gaseosa del gas natural requerirá un mayor volumen que en caso de la gasolina, por lo que será necesario disponer de espacio.

Renault Captur no cuenta con un maletero excesivamente grande (455 L), pero si presenta la ventaja de esconder un doble fondo, ideal como espacio suplementario para albergar las botellas de combustible.

El objetivo será, en todo momento, evitar reducir el volumen aprovechable del maletero, accediendo únicamente al uso de este doble fondo, y considerando inadmisibles obstruir el espacio principal, aunque ello conlleve sacrificar cierta autonomía.



VOLUME (dm ³)		
VDA (ISO 3832) up to parcel shelf (min / max)	377 / 455	
Maximum boot volume with rear seats folded and up to roof	1 235	
DIMENSIONS (mm)		
A	Wheelbase	2 606
B	Overall length	4 122
C	Front overhang	866
D	Rear overhang	650
E	Front track	1 531
F	Rear track	1 516
G	Overall width without exterior mirrors	1 778
H	Overall height	1 566
H1	Overall height with tailgate open	1 920
J	Unladen boot sill height	725
K	Ground clearance	170
L	Rear knee room	215
M	Front elbow room	1 380
M1	Rear elbow room	1 370
N	Front shoulder room	1 386
N1	Rear shoulder room	1 330
P	Front headroom measured at 14°	905
P1	Rear headroom measured at 14°	860
Y	- Upper boot aperture width	940
	- Maximum boot aperture width	1 010
Y1	Lower boot aperture width	983
Y2	Inside width between wheel arches	990
Z	Height of rear opening	685
Z1	Maximum load length (rear seats folded)	1 388
Z2	Load length behind rear seats (rear bench forward / rearward)	884 / 724
Z3	Height up to the parcel shelf	595

Ilustración 6. Dimensiones principales del vehículo Renault Captur

3.1.2 Conversión del vehículo

Las conversiones a realizar en el vehículo para adaptarlo al empleo de gas natural comprimido difieren mucho según la etapa del diseño en que se efectúen: según sean diseñadas por la marca o realizadas por el usuario en un taller especializado.

Si la transformación se concibe desde la marca, el estudio de las modificaciones se encaminará a lograr un óptimo aprovechamiento de los espacios, con un rediseño de muchas de las funciones y elementos.

Los conductos de combustible optimizarán sus materiales y zonas por las que transcurrirán, los calculadores para el control del motor se dispondrán en lugares oportunos, y se replantearán posibles modificaciones en la carrocería en la zona del piso para albergar los nuevos depósitos.

Como se comprobará más adelante, una de las principales desventajas del gas natural comprimido frente a la gasolina, es la necesidad de un mayor volumen de almacenamiento para el combustible. Este hecho obliga a plantear la ubicación de los tanques de GNC, pues el espacio que queda vacante con la retirada del depósito de combustible será insuficiente. En la mayoría de los casos, el espacio sacrificado es el destinado a albergar la rueda de repuesto, pues permite no reducir el espacio de almacenamiento del maletero.

Si bien esta solución se alcanza fácilmente en el caso de vehículos impulsados con gas natural licuado, en los que el depósito puede adaptarse a la perfección al volumen de la rueda de repuesto, en el caso del GNC, las bombonas de combustible conllevan mayores dificultades de adaptación. Es necesario modificar por completo la parte trasera del piso para eliminar el volumen de la rueda de repuesto y permitir que las bombonas de GNC puedan disponerse en la zona inferior. Esta conversión conlleva, entre otras modificaciones, diseñar nuevas fijaciones para los depósitos.

Si, por el contrario, la conversión se realiza con el vehículo ya en circulación, acudiendo a un taller especializado, la adaptación debe recurrir al aprovechamiento de los espacios existentes. En este caso, es inevitable recurrir a parte del volumen del maletero si se quiere mantener la totalidad de la autonomía inicial del vehículo o gran parte de ella.

En el presente trabajo se ha optado por una solución más próxima al segundo caso, en la que la conversión se realiza sin ninguna modificación en la carrocería del vehículo, adaptando el espacio ya disponible en el vehículo a la venta en el mercado.

Modificaciones en el sistema de almacenamiento

El cambio de un combustible líquido como la gasolina a uno gaseoso como el GNC, conlleva una total transformación del sistema de almacenamiento, comenzando por el cambio de un depósito de base polimérica sin sollicitación de esfuerzos, a un depósito metálico que tiene que soportar la elevada presión a la que se encuentra el gas.

Modificaciones en el motor

Junto con el cambio en el sistema de almacenamiento, el motor es el elemento más afectado por la conversión. Para el presente trabajo se ha optado por mantener por completo el bloque motor del vehículo inicial de gasolina, al que se considerará que mantiene sus rendimientos en el funcionamiento con GNC.

Las modificaciones, que serán estudiadas en el siguiente capítulo, se limitarán a lo referente a las **oportunidades** que proporciona el gas natural y las modificaciones necesarias para optimizar el funcionamiento del motor con el nuevo combustible. Las variaciones afectarán al ciclo, la mezcla, sobrealimentación, relación de compresión, admisión o escape.

Junto con el motor, existe la posibilidad de requerir una adaptación de la caja de velocidades que sirva para optimizar el comportamiento bajo las nuevas condiciones de funcionamiento.

3.2 Adaptación del motor

3.2.1 Motor inicial

La conversión para el empleo de gas natural como combustible principal requiere de un motor de encendido provocado. Por ello, se ha escogido uno de los motores gasolina del vehículo Renault Captur, el modelo **Energy TCe 90 CV**.

Se trata de un motor sobrealimentado, con 3 cilindros para una cilindrada total de 900 cc. El motor cuenta con un tiempo de válvulas variable (VVT) que, combinado con el turbo integrado, asegura que el máximo par esté disponible a bajo régimen de giro. La potencia máxima de 90 CV se otorga a un régimen de 5000 rpm y el par máximo de 135 Nm, entre 2000-3500 rpm, estando el 90% del par máximo disponible desde 1650 rpm [Gráfico 3].

El motor cumple con las limitaciones del estándar EURO5, empleando un catalizador de 3 vías para el control de emisiones.

Energy TCe 90	
Número de cilindros	3
Número de válvulas	12
Diámetro x carrera (mm)	72.2 x 73.1
Cilindrada total (cc)	898
Potencia máxima (kW (CV))	66 (90)
Régimen de max. potencia (rpm)	5000
Par máximo (Nm)	135
Régimen de max. par (rpm)	2000-3500
Ratio de compresión	9.5 :1
Inyección combustible	Secuencial multipunto
Turbocompresor	Waste Gate
Combustible	RON 95
Estándar de emisiones	Euro5
Dimensiones (L x W x H)	575 x 637 x 691
Masa (kg)	94

Tabla 3. Especificaciones principales motor TCe 90 CV [Renault Powertrain]

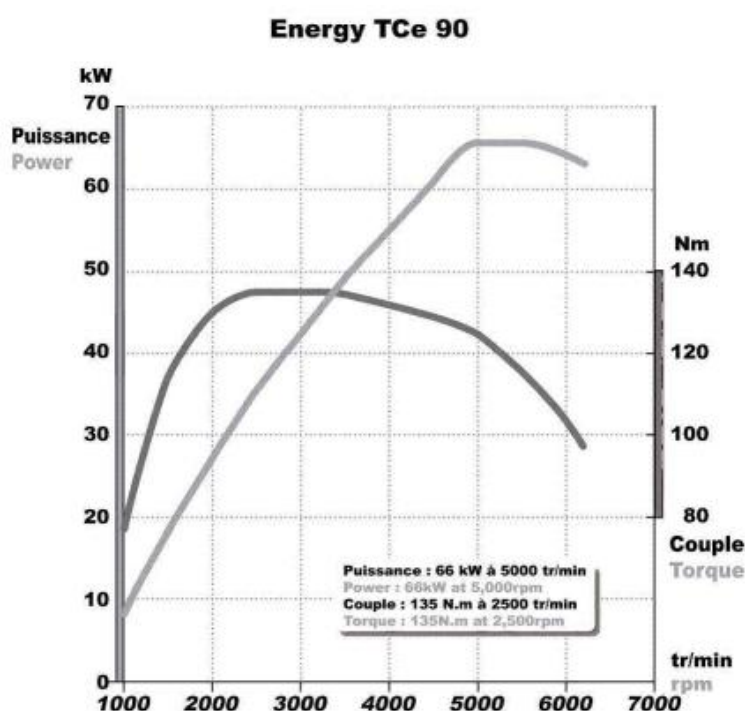


Gráfico 3. Potencia y par motor Energy TCe 90 [Renault Powertrain]

3.2.2 Nueva configuración del motor

Al tratarse el gas natural de un combustible sustitutivo de la gasolina, el comportamiento del motor sufre leves variaciones. La combustión es más limpia y homogénea, genera menos residuos y castiga menos a la mecánica, lo que a la larga puede traducirse en un **aumento de la durabilidad del motor**.

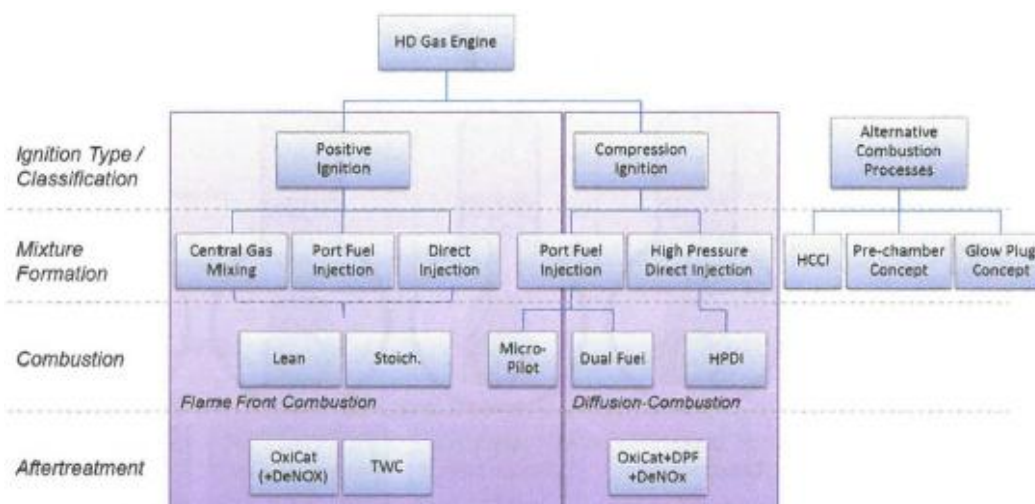


Diagrama 1. Estructura de los procesos para vehículos impulsados por gas natural [Basshuysen, 2016]

El objetivo del presente estudio es conocer las características para un motor que funcione con gas natural comprimido. Escogiendo una configuración monovalente, dedicada en exclusiva a la combustión de gas natural, se requiere el empleo de un motor de encendido provocado.

La inyección del gas que se considerará para esta conversión es una **inyección indirecta multipunto** (en próximos apartados se profundizará en este aspecto).

La mezcla a emplear en la combustión, pobre o estequiométrica, estará condicionada por la potencia a suministrar, consumo y el uso de dispositivos reductores de emisiones contaminantes.

Emplear **mezcla estequiométrica** penalizará el consumo, pero permitirá emplear catalizadores de tres vías muy desarrollados para la reducción de las emisiones contaminantes, con una ventana operacional situada en torno a $F_r=1$.

Emplear **mezcla pobre mejora el rendimiento y el consumo**, sin embargo se aleja de la ventana operacional en la que el catalizador de 3 vías puede reducir en gran medida CO, NOx y HC, siendo necesario un catalizador de oxidación que elimine el CO y los HC sin quemar, y un catalizador acumulador para los NOx. Además, el empleo de mezcla pobre requiere encendido por precámara, lo que dificulta aún más su empleo. En el Gráfico 4 se muestra el área operacional para trabajar con gas natural con mezcla pobre.

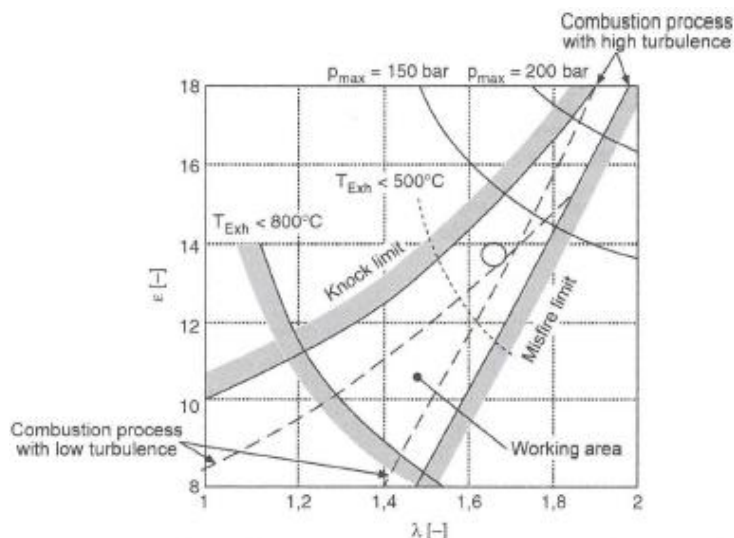


Gráfico 4. Área operacional del proceso de combustión de gas natural para mezcla pobre [Basshuysen, 2016]

Se hará a continuación un repaso a todas las características relacionadas con el motor que pueden verse modificadas como resultado del cambio de combustible: potencia, transmisión o ruido, así como las nuevas posibilidades de funcionamiento del motor que plantea el nuevo combustible.

POTENCIA

La variación de las características de funcionamiento con el nuevo combustible modificará también la potencia que es capaz de proporcionar el motor. Se establecerá una comparativa entre la potencia del motor inicial a gasolina y la nueva potencia del motor para gas natural [Payri, 2011]:

$$N_e = \dot{m}_f \cdot PCI \cdot \eta_e = \dot{m}_a \cdot F \cdot PCI \cdot \eta_e = i \cdot n \cdot V_T \cdot \rho_{ia} \cdot \eta_v \cdot X_a \cdot F_r \cdot F_e \cdot PCI \cdot \eta_e \text{ (kW)}$$

Los términos fundamentales de la ecuación que variarán respecto a la configuración inicial para gasolina y la nueva configuración para gas natural son el dosado estequiométrico, el dosado relativo, el poder calorífico del combustible, la fracción molar de aire en la mezcla y el rendimiento efectivo.

$$\frac{N_{GN}}{N_{gasolina}} = f(F_e, F_r, PCI, X_a, \eta_e)$$

La ecuación para el cálculo de la potencia puede agruparse en factores bien diferenciados:

$$N_e = K_D \cdot K_O \cdot EFQ$$

- K_D agrupa las variables función del diseño del motor.
- K_O agrupa las variables función de las condiciones de funcionamiento del motor.
- EFQ (Engine Fuel Quality) engloba a las variables que son características del combustible.

$$K_D = i \cdot V_T \cdot \eta_v \cdot \eta_e \text{ (m}^3\text{)}$$

Dentro de los términos que son función del diseño del motor, i permanecerá constante con la adaptación al nuevo combustible, al igual que la cilindrada total V_T , ya que se hará uso del mismo bloque motor. El rendimiento volumétrico no varía al tratarse de un motor sobrealimentado. El rendimiento efectivo depende de los rendimientos indicado y mecánico lo que puede variar. El rendimiento indicado depende de la combustión, es función del dosado relativo, el avance del encendido y la transmisión de calor, mientras que el rendimiento mecánico es función de las pérdidas mecánicas y el grado de carga:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$$

$$\eta_i = \eta_i(F_r, \alpha_o, \dot{Q}_\omega(n))$$

$$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \eta_m(n, \Phi)$$

En primera aproximación, se supondrá que el rendimiento efectivo es semejante al inicial para el motor de gasolina.

$$K_O = n \cdot \rho_{ia} \cdot F_r \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$$

En cuanto a las condiciones operativas, el régimen de funcionamiento puede considerarse invariable, aunque como se verá más adelante, la zona de mínimo consumo específico para gas natural se encuentra a un régimen menor que la de gasolina y, por tanto, es deseable reducir el régimen de funcionamiento a ese valor. La densidad del aire en las condiciones del colector será la misma, ya que en ambos casos influirán las pérdidas de carga (filtro, mariposa...) o la temperatura, pero hay que suponer que se actúa sobre la sobrealimentación para conseguir los mismos valores, teniendo en cuenta que hay menos temperatura de escape y que los gastos son mayores. Por último, el **dosado relativo** dependerá de si se continúa con mezcla estequiométrica propia de gasolina, o si por el contrario se opta por mezcla pobre: puede ser uno de los parámetros en los que exista variación.

$$EFQ = X_a \cdot F_e \cdot PCI \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg mezcla}} \right)$$

En los parámetros característicos del combustible aparecerán las principales diferencias. El **dosado estequiométrico** (F_e) será función de la composición del combustible, por lo que será distinto en ambos casos; del mismo modo que sucede con el **poder calorífico por unidad de masa** (PCI). X_a es la fracción molar de aire en la mezcla. Para el caso de la gasolina, se considera igual a la unidad, dada su naturaleza líquida, sin embargo, para el gas natural será inferior:

$$X_a = \frac{n_a}{n_a + n_h + n_f} = \frac{\frac{1}{29}}{\frac{1}{29} + \frac{h}{18} + \frac{F_r \cdot F_e}{M_f}}$$

El valor de X_a depende del dosado. Para hallar el dosado estequiométrico del combustible se acude a la **composición de referencia del gas** natural que se empleará en todos los cálculos, correspondiente al suministro en Valladolid en abril de 2011 [Tabla 4].

Por simplicidad en los cálculos, los componentes del combustible de mayor masa molecular, que son menos representativos por su baja fracción molar, serán sumados a la fracción molar de propano.

Compuesto	Fracción molar X	Compuesto	Fracción molar X
Nitrógeno	0,01094	Nitrógeno	0,01094
Diox. Carbono	0,02027	Diox. Carbono	0,02027
Metano	0,85782	Metano	0,85782
Etano	0,09387	Etano	0,09387
Propano	0,01420	Propano	0,01710
i-Butano	0,00114		
n-Butano	0,00134		
i-Pentano	0,00023		
n-Pentano	0,00016		
n-Hexano	0,00003		

Tabla 4. Composición de gas natural que se empleará en el presente estudio (izquierda) y composición simplificada para cálculo del dosado estequiométrico (derecha)

Para esta composición, como resultado de la combustión estequiométrica, resulta un dosado estequiométrico:

$$F_e = 16.91$$

En la siguiente tabla se muestra la **masa molecular**, necesaria para el cálculo de X_a y el **poder calorífico por unidad de masa** del combustible:

Compuesto	M (g/mol)	H _c (MJ/kg)	Fracción molar X	Fracción másica Y	X · M (g/mol)	H _c total (MJ/kg)
Nitrógeno	28,0	0,0	0,01094	0,01649	0,306	0,000
Diox. Carbono	44,0	0,0	0,02027	0,04800	0,892	0,000
Metano	16,0	50,0	0,85782	0,74056	13,759	37,028
Etano	30,1	47,5	0,09387	0,15192	2,823	7,216
Propano	44,0	46,2	0,01420	0,03363	0,625	1,554
i-Butano	58,1	45,7	0,00114	0,00356	0,066	0,163
n-Butano	58,0	45,7	0,00134	0,00418	0,078	0,191
i-Pentano	72,0	42,9	0,00023	0,00089	0,017	0,038
n-Pentano	72,0	45,3	0,00016	0,00062	0,012	0,028
n-Hexano	86,0	44,0	0,00003	0,00014	0,003	0,006
TOTAL			1	1	18,580	46,225

Tabla 5. Composición y PCI del gas natural empleado.

$$PCI_{GN} = 46225 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$M_{GN} = 18.58 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Cálculo de X_a (suponiendo $h=0$):

$$X_a = \frac{n_a}{n_a + n_h + n_f} = \frac{\frac{1}{29}}{\frac{1}{29} + \frac{h}{18} + \frac{F_r \cdot F_e}{M_f}} = \frac{\frac{1}{29}}{\frac{1}{29} + \frac{1}{16.91}} = 0.9155$$

Los valores de los parámetros que son función del combustible, se muestran en la siguiente tabla para gasolina y gas natural:

Combustible	X_a	F_e	PCI (kJ/kg)
Gasolina	1	1/15	43000
Gas natural	0,9155	1/16,91	46225

Tabla 6. Propiedades de los combustibles

Se está en disposición de calcular el EFQ de ambos combustibles:

$$EFQ_{\text{gasolina}} = X_{a \text{ gasolina}} \cdot F_{e \text{ gasolina}} \cdot PCI_{\text{gasolina}} = 1 \cdot \frac{1}{15} \cdot 43000 = 2866.67 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg mezcla}} \right)$$

$$EFQ_{GN} = X_{a \text{ GN}} \cdot F_{e \text{ GN}} \cdot PCI_{GN} = 0.9155 \cdot \frac{1}{16.91} \cdot 46225 = 2502.6 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg mezcla}} \right)$$

Este parámetro puede expresarse también como poder calorífico de la mezcla por unidad de volumen:

$$H_{ve,vol} = EFQ \cdot \rho_{ia}$$

Para las condiciones de aire:

Presión: 1atm; Temperatura: 15°C

$$M = 2 \cdot 16 \cdot 0.21 + 2 \cdot 14 \cdot 0.79 = 28.84 \text{g/mol}$$

$$\rho_{ia} = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} = \frac{1 \text{atm} \cdot 28.84 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{L} \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 288\text{K}} = 1.22 \frac{\text{g}}{\text{L}} = 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El poder calorífico de la mezcla por unidad de volumen de ambos combustibles será:

$$H_{ve,vol \text{ gasolina}} = EFQ_{\text{gasolina}} \cdot \rho_{ia} = 2866.67 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mezcla}} \cdot 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3497.34 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ mezcla}}$$

$$H_{ve,vol \text{ GN}} = EFQ_{GN} \cdot \rho_{ia} = 2502.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mezcla}} \cdot 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3053.17 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ mezcla}}$$

Estos parámetros permiten expresar la potencia del siguiente modo:

$$N_e = K_D \cdot n \cdot F_r \cdot H_{ve,vol}$$

Comparando las potencias para ambos combustibles y eliminando todos los términos comunes:

$$\frac{N_{GN}}{N_{\text{gasolina}}} = \frac{\eta_{e \text{ GN}}}{\eta_{e \text{ gasolina}}} \cdot \frac{F_{r \text{ GN}}}{F_{r \text{ gasolina}}} \cdot \frac{H_{ve,vol \text{ GN}}}{H_{ve,vol \text{ gasolina}}}$$

El rendimiento efectivo η_e puede suponerse igual para ambos combustibles, aunque el gas natural presenta la ventaja de poder aumentar la relación de compresión, lo que aumentaría el rendimiento efectivo.

F_r será 1 para el gas natural si se emplea mezcla estequiométrica, como ocurre con la gasolina. Si se opta por mezcla pobre, F_r tomará valor 0.6-0.7, penalizando seriamente a la potencia.

Usando el gas natural mezcla estequiométrica y suponiendo iguales los rendimientos efectivos para ambos combustibles, la relación de potencias resultante será:

$$\frac{N_{GN}}{N_{gasolina}} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{3053.17}{3497.34} = 0.873$$

Se trata de una reducción de potencia del 12.7%, aunque esta diferencia podría solventarse por distintos medios que permite el uso de gas natural: aumentando la relación de compresión, aumentando la sobrealimentación, optimizando el avance del encendido...

MODIFICACIONES ASOCIADAS A LA ADAPTACIÓN A GNC Y OPORTUNIDADES PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Por las características del gas natural como combustible, se presentan una serie de opciones para optimizar el funcionamiento del motor: mejoras en la potencia, reducción del consumo específico...

RELACIÓN DE COMPRESIÓN

El excelente **comportamiento antidetonante** del gas natural [130 octanos] (Gráfico 5), permite **incrementar la relación de compresión** respecto a los motores de gasolina, pudiendo alcanzar relaciones de $r=13,5$ para motores de aspiración natural (AN) o $r=12$ para motores sobrealimentados (SA); frente a $r=11$ de los motores gasolina AN y $r=9.5$ de los SA (como es el caso del motor del Renault Captur Energy TCe 90). Esto se traduce en un aumento de la presión máxima de combustión y del rendimiento efectivo, lo que acerca aún más los valores de potencia para ambas alternativas de combustible.

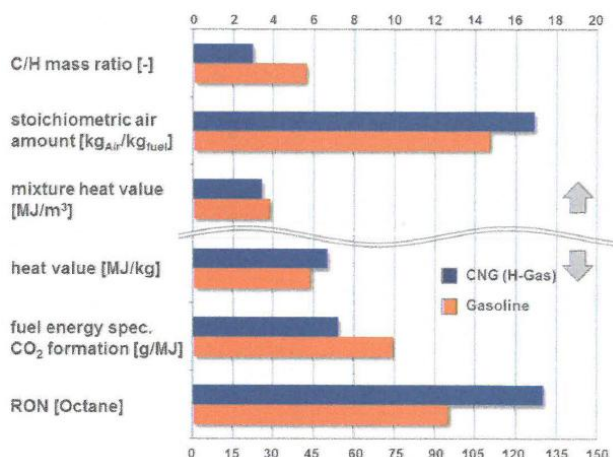


Gráfico 5. Parámetros del combustible para gasolina y gas natural [Basshuysen, 2016]

COMBUSTIÓN

Encendido

El encendido eléctrico puede producirse con **mayor avance** respecto al punto muerto superior que en el caso de gasolina, lo que supone una **mejora en la dispersión cíclica**. La energía de encendido para gas natural debe ser mayor que para gasolina, mientras que las bujías tendrán que ser más frías.

Presión de combustión

El incremento de la relación de compresión y el avance de la combustión provocan una **mayor presión máxima** en el caso de gas natural. Como consecuencia de ello, la temperatura a la apertura de la válvula de escape será menor para el gas natural, aunque la temperatura del cilindro será mayor.

Centrado de la combustión

Tal y como puede observarse en el Gráfico 6, el gas natural permite un adelanto de la combustión a causa de su mayor resistencia a la autoinflamación, de manera que se optimiza el rendimiento, especialmente a regímenes bajos (2000 rpm).

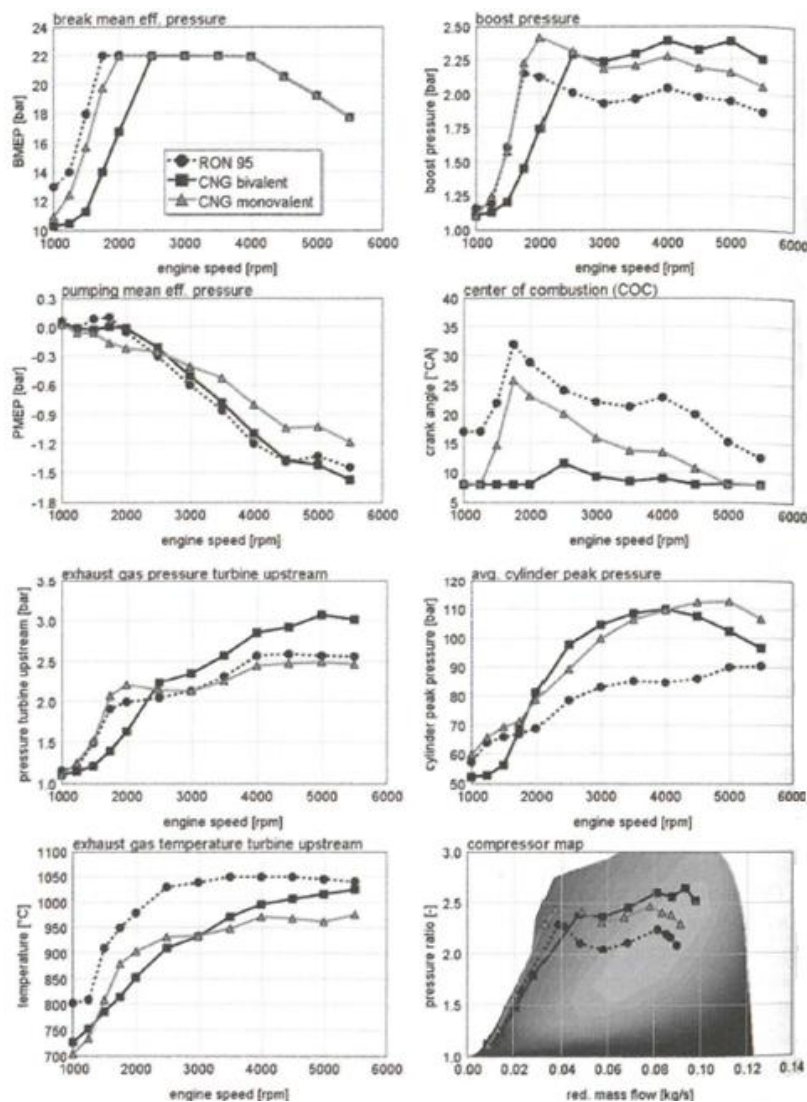


Gráfico 6. Comparación a plena carga: monovalente(GN), gasolina(ROn95) y bi-fuel [Basshuysen, 2016]

Velocidad de combustión

La velocidad de combustión laminar para metano y gasolina puede observarse en el Gráfico 7. Asumiendo un comportamiento para el gas natural de referencia para el estudio (fracción molar de metano: 85.7%) similar al del metano, en caso de emplear **mezcla estequiométrica**, se aprecia que la velocidad de combustión del gas natural es superior a la de gasolina, que emplea dosado estequiométrico. En caso de **mezcla pobre**, ($Fr = 0.6$, $1/Fr=1.67$) la velocidad de combustión del gas natural será considerablemente inferior a la de la gasolina (con dosado estequiométrico).

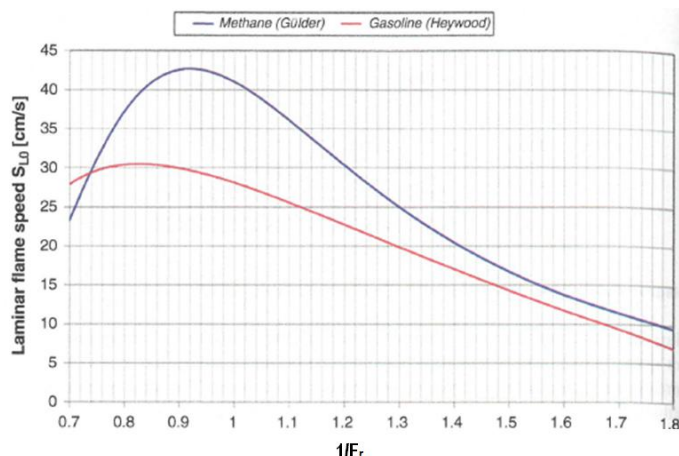


Gráfico 7. Velocidad de combustión laminar para metano y gasolina según Gülder y Haywood para condiciones de referencia (298K y 1 atm) [Basshuysen,2016]

Presión de sobrealimentación

El empleo de gas natural comprimido requiere un **aumento de la presión de sobrealimentación**. Como se aprecia en el Gráfico 6, se debe aumentar aproximadamente 0.25 bar respecto al gasolina- Para aumentar la presión de sobrealimentación se hace uso de turbinas pequeñas con válvulas *waste gate* grandes, de esta forma, se reduce el flujo másico a cambio de aumentar la presión.

Refrigeración

Aunque para el empleo de gas natural existe una temperatura de combustión ligeramente superior, puede considerarse que la refrigeración puede conservarse respecto al modelo inicial con empleo de gasolina.

Gases de escape

Destaca una menor temperatura de los gases de escape que en el caso de gasolina, como se aprecia en la menor energía disponible en la turbina (Gráfico 6). Esto puede incidir negativamente, como se explicará más adelante, en la conversión en el catalizador de los hidrocarburos sin quemar, ya que requieren mayor temperatura que en los gasolina. La presión a la entrada de la turbina es similar a la del gasolina, ligeramente superior a bajo régimen y ligeramente superior a alto régimen (Gráfico 6).

Mezcla gas natural-H₂

El interés de emplear una mezcla de gas natural e hidrógeno radica en aprovechar las ventajas complementarias de ambos combustibles. Al añadir H₂ a la mezcla, la velocidad de combustión aumenta, lo que conlleva una **mejora en la dispersión cíclica**, como se puede ver en el Gráfico 8.

El incremento en la velocidad de llama también contribuye a disminuir las emisiones de CO y HC. Además, el mayor rango de inflamabilidad del H₂ supone un punto a favor de emplear mezcla pobre, con la consecuente reducción del consumo y las emisiones de NOx.

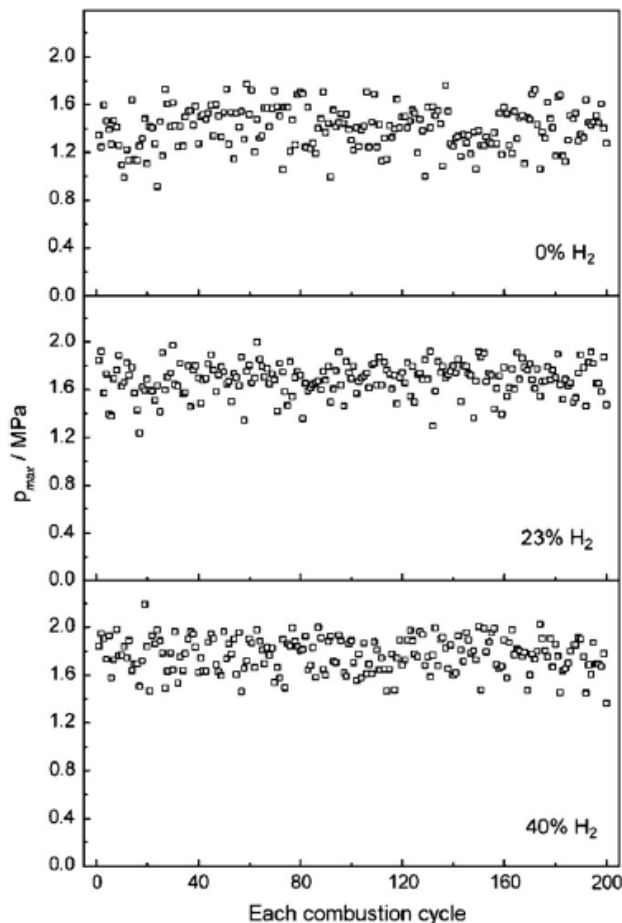


Gráfico 8. Dispersión en la presión media efectiva para distintos porcentajes de H₂ añadidos (porcentaje por volumen en el gas natural) [Korakianitis, 2009]

Ciclo Atkinson y ciclo Miller

Ciclo Atkinson: Una de las primeras oportunidades a desarrollar es el empleo de ciclo Atkinson. Este ciclo difiere del ciclo Otto usado tradicionalmente en los motores de encendido provocado, en que se retrasa el cierre de la admisión. En el ciclo Otto existe peligro de autoinflamación si se eleva demasiado la relación de compresión, sin embargo, en el ciclo Atkinson, al existir una menor carrera de compresión, ya que no se inicia hasta el cierre de la válvula de admisión, el peligro se reduce. Esto permite elevar la relación de compresión geométrica del motor, que se une además a las posibilidades que ofrece el mayor poder antidetonante del gas natural. La relación de compresión efectiva no se produce entre el PMI y el PMS, sino entre cierre de la admisión y PMS, por lo que es inferior.

$$r = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}}$$

$$r_{\text{efectiva}} = \frac{V_{\text{Cierre Adm.}}}{V_{PMS}}$$

$$r_{\text{efectiva}} < r$$

Existe un reflujo de mezcla desde el cilindro hacia la admisión: la cantidad de masa al cierre de la admisión se reduce, por lo que al existir menos mezcla en el cilindro, la potencia que proporciona el motor es menor.

Entre el paso del pistón cuando está bajando y pasa por el ángulo en el que se cerrará la admisión cuando el pistón esté subiendo, el ciclo de bombeo no genera pérdidas. La carrera de escape usa la relación de expansión entre PMS y PMI, por lo que se obtiene más trabajo y por tanto, el rendimiento indicado es mayor.

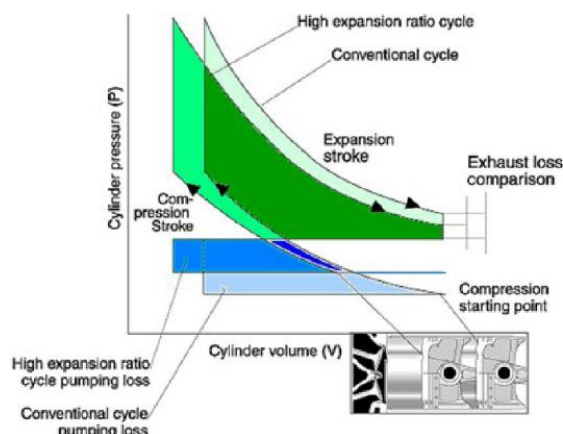


Ilustración 7. Funcionamiento del motor de un vehículo Toyota híbrido con ciclo Atkinson

$$\Gamma_{\text{expansión}} > \Gamma_{\text{compresión}}$$

$$\downarrow W_{\text{BOMBEO}}$$

Ciclo Miller. El ciclo Miller logra un efecto similar al ciclo Atkinson, pero en lugar de retrasando el cierre de la admisión, lo hace adelantándolo. Al cerrar la admisión durante el descenso del pistón, se produce una expansión del contenido del cilindro, por lo que la presión baja. El recorrido del pistón desde el cierre hasta el PMI y su posterior subida, hace que la trayectoria de la presión vuelva al mismo punto, por lo que no se existe trabajo de bombeo en dicha parte.

Al no existir reflujo de masa al colector de admisión, no se pierde potencia, aunque el descenso de presión en el cilindro por debajo de la presión atmosférica, puede suponer un inconveniente para el consumo de aceite.

En resumen, ambos ciclos logran **reducir el trabajo de bombeo y reducir la relación de compresión efectiva**, manteniendo la relación de expansión, por lo que **incrementa el rendimiento indicado** del motor.

$$\Gamma_{\text{expansión}} > \Gamma_{\text{compresión}}$$

$$\downarrow W_{\text{BOMBEO}}$$

Además permite aumentar la relación de compresión geométrica hasta que la efectiva alcance su máximo valor admisible sin que se produzca autoinflamación, el rendimiento puede aumentar más. Es destacable en este aspecto el alto octanaje del gas natural, lo que permite un considerable aumento de la relación de compresión.

El ciclo Atkinson presenta el problema de que la reducción de masa en el cilindro durante la combustión provoca menores potencias que en el ciclo Otto.

El principal problema del ciclo Miller es la baja presión en el cilindro al final de la carrera de admisión, algo que puede resolverse con sobrealimentación. También se baraja el uso de *intercooler* en la admisión para reducir la temperatura y poder introducir mayor cantidad de masa en el cilindro.

CURVAS DE PRESTACIONES DEL MOTOR Y VARIACIÓN DE LA TRANSMISIÓN

En el caso de un motor de aspiración natural, como se ha analizado en el apartado dedicado a la potencia, el factor EFQ se reduce para el gas natural a causa del mayor volumen ocupado por el combustible en la cámara y el menor dosado estequiométrico.

Para un motor sobrealimentado, como es el caso, y para una misma cilindrada, las curvas de presión media efectiva y de potencia pueden mantenerse tras la conversión, aumentando la presión de sobrealimentación.

Como puede apreciarse en el Gráfico 9, perteneciente al motor Mercedes-Benz 2.0 L "M274 Gas natural, el motor con gas natural puede funcionar manteniendo el régimen y la presión media efectiva, con el beneficio de reducir el consumo de 240 g/kWh a 205 g/kWh (15%) y un 24% las emisiones de CO₂. Sin embargo, se observa que la zona de mínimo consumo se alcanza para menor régimen de giro y mayor grado de carga, donde se alcanza un consumo de 195 g/kWh (19%) y una reducción del 28% de emisiones de CO₂ con respecto a gasolina.

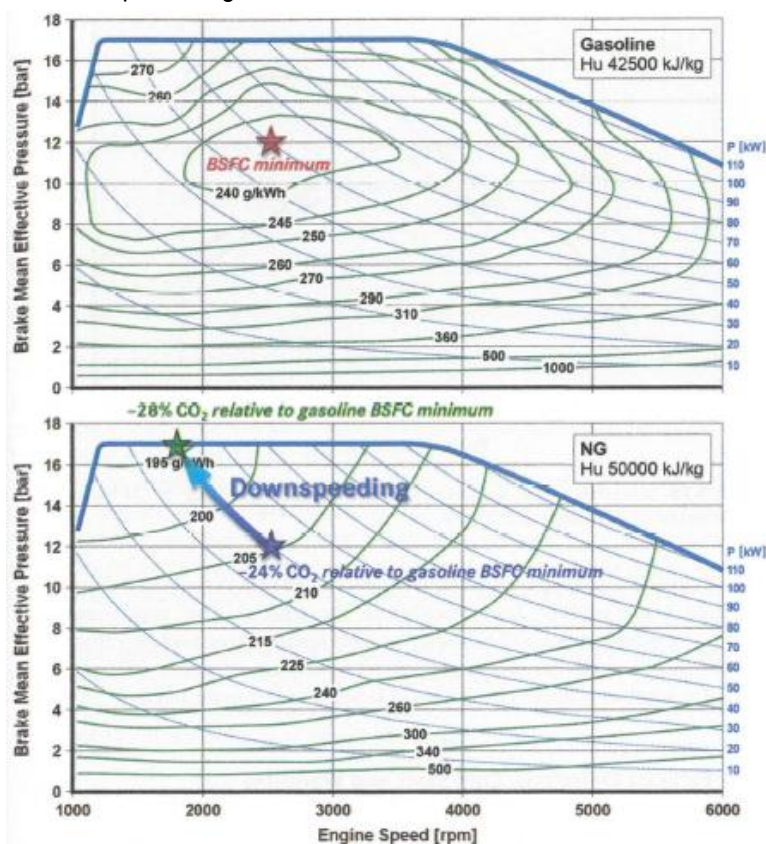


Gráfico 9. Consumo específico de combustible del motor Mercedes-Benz 2.0 L "M274 NG" [Basshuysen,2016]

Para adaptar la nueva zona de funcionamiento óptimo del motor, sería necesario variar la relación de la caja de velocidades.

El régimen para el mínimo consumo específico se reduce de 2500 rpm a 1800 rpm, por lo que las nuevas relaciones de la caja de velocidades se construirán en base a ello.

	JH3	
1st	11x41	11x41
2nd	21x43	21x43
3rd	28x39	28x37
4th	31x34	30x29
5th	37x33	42x31
Final drive	15x58	16x55
Energy	Gasolina	Diesel

Tabla 7. Relaciones de engranajes para la caja de cambios JH3 para sus variantes gasolina y diesel [Renault Powertrain]

Se plantea la posibilidad de cambiar la caja de cambios empleada por otra de las disponibles. El menor régimen óptimo de funcionamiento de los motores diesel invita a considerar optar por una caja dedicada a este tipo de motor.

Se calcula a continuación la relación idónea de reducción para adaptarse al régimen de giro inicial, 2500 rpm, y al nuevo régimen óptimo, 1800 rpm. Escogiendo la 5ª marcha, en la que más apreciable puede resultar la modificación se tiene:

$$\frac{\omega_{conducida}}{\omega_{conductor}} = \frac{Z_{conductor}}{Z_{conducida}}$$

Para la caja inicial para motor gasolina, con el régimen de partida:

$$\omega_{conducida} = \omega_{conductor} \cdot \frac{Z_{conductor\ 5^a}}{Z_{conducida\ 5^a}} \cdot \frac{Z_{conductor\ final}}{Z_{conducida\ final}} = 2500\text{rpm} \cdot \frac{37}{33} \cdot \frac{15}{58} = 725\text{rpm}$$

Buscando que se mantenga la velocidad de giro de las ruedas, 725rpm, se comprueba el comportamiento para el nuevo régimen óptimo, empleando la caja de cambios dedicada a motor diesel:

$$\omega_{conducida} = \omega_{conductor} \cdot \frac{Z_{conductor\ 5^a}}{Z_{conducida\ 5^a}} \cdot \frac{Z_{conductor\ final}}{Z_{conducida\ final}} = 1800\text{rpm} \cdot \frac{42}{31} \cdot \frac{16}{55} = 710\text{rpm}$$

Se puede concluir que la velocidad de giro en las ruedas es muy similar (reducción del 2%), por lo que una solución adecuada sería intercambiar la caja del vehículo gasolina por una dedicada a un vehículo diesel.

RUIDO

Con el uso de gas natural, el ruido del motor se reduce con respecto al de gasolina o el diesel, ya que la intensidad de la explosión es menor, y con ello, las vibraciones producidas. En el Gráfico 10 se observa que el nivel de ruido para los motores de gas es considerablemente inferior que para un motor diesel. Aunque esta diferencia se reduce respecto a un motor gasolina de similar potencia, el comportamiento del gas natural sigue siendo mejor en este aspecto. Con unos límites de ruido cada vez más estrictos, el gas natural se presenta como una alternativa idónea en este aspecto.

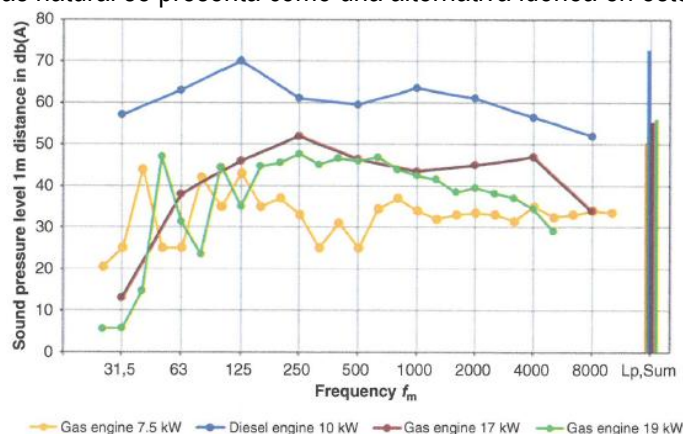


Gráfico 10. Nivel del espectro de ruido a 1m de distancia para motores diesel y de gas natural [Basshuysen, 2016]

3.3 Descripción de los elementos del sistema

3.3.1 Elementos del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento es el que más modificaciones conlleva a causa de la conversión del sistema de gasolina a gas natural. Conlleva la sustitución del depósito de almacenamiento y la instalación de diversos elementos para garantizar el almacenamiento y alimentación del combustible al motor.

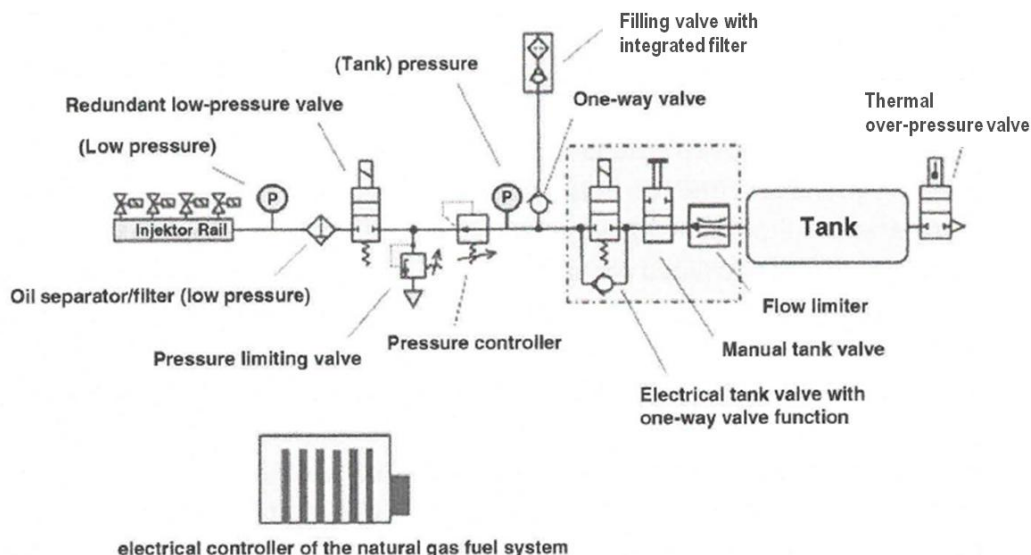


Ilustración 8. Componentes del sistema de almacenamiento de gas natural comprimido [Basshuysen,2016]

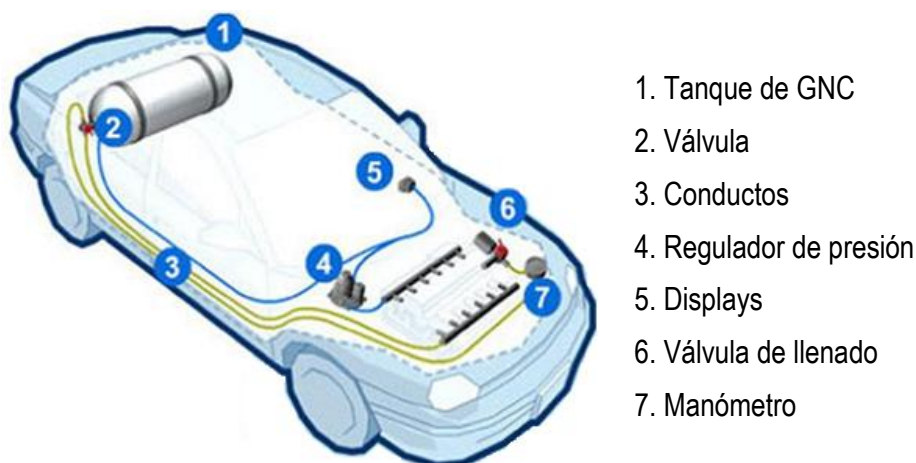


Ilustración 9. Elementos principales del sistema de almacenamiento de GNC

1. TANQUES DE GNC

Depósitos de almacenamiento de combustible. Almacenan el gas natural comprimido a 200 bar. Serán de **forma cilíndrica** por facilidades de diseño, con los extremos semiesféricos, fabricados sin soldadura para evitar concentraciones de esfuerzos. Los materiales más utilizados son el **acero** y el **aluminio** con refuerzos de fibra.

La necesidad de un mayor volumen que el de un depósito de gasolina, obliga a idear soluciones a su ubicación. Si el vehículo se gesta de inicio para el uso de gas natural comprimido, se plantean modificaciones para albergarlo bajo el piso, de forma que no se reduzca la habitabilidad ni el espacio del maletero. Si se trata de una conversión posterior, puede ser inevitable tener que recurrir al espacio del maletero para su alojamiento.

Mientras que los depósitos de almacenamiento de los combustibles líquidos tradicionales presentan grandes facilidades de diseño al encontrarse los combustibles en estado líquido, para el

caso del GNC y la alta presión a la que se encuentra confinado, es necesario recurrir a dispositivos de gran espesor y con diseños mucho más restringidas.

Para adaptarse al espacio disponible, sin tener que recurrir a modificar el chasis del vehículo (supresión espacio para rueda de repuesto) ni a eliminar por completo el espacio útil del maletero, la disposición de las botellas será bajo el piso del vehículo, adaptándose a la zona originalmente ocupada por el depósito de gasolina. Esto conllevará un estudio pormenorizado de la zona y un replanteamiento de la arquitectura a la hora de disponer los distintos elementos, como puede ser el caso del tubo de escape. Los depósitos se fijan bajo el piso del vehículo con cintas tensoras.

2. VÁLVULA DE BOTELLA

Son los dispositivos de seguridad instalados en la salida de gas de las botellas, para controlar el exceso de presión y la apertura y cierre del circuito.

3. CONDUCTOS

Tubos rígidos para conectar los depósitos de GNC con la admisión del motor. Todos los conductos salientes de las botellas de almacenamiento será de acero protegido contra la corrosión y con uniones soldadas. En determinados puntos existirán filtros y separadores de aceite. Los conductos finalizarán en los raíles de inyección del combustible.

4. REGULADOR DE PRESIÓN

Permite regular la presión para la alimentación de GNC al motor. Con distintas etapas de regulación, permite mantener constante la presión del gas a la hora de introducirlo en el sistema de alimentación).

5. DISPLAY INDICADOR DE NIVEL Y SELECTOR DE COMBUSTIBLE

Es la pantalla encargada de mostrar al conductor la información referente al almacenamiento, indicando el nivel de GNC disponible en la botella y la presión de almacenamiento. En caso de tratarse de un vehículo bi-fuel que permita alternar entre el uso de gasolina y gas natural, el selector permite escoger el tipo de combustible a emplear.

6. VÁLVULA DE LLENADO

Sistema de repostaje para la carga de GNC. Su disposición será variable en función del espacio disponible para su alojamiento. El sistema de carga está estandarizado en toda Europa, siendo el modelo NGV1 para los turismos. La válvula de llenado cuenta con un filtro integrado y una válvula de una vía que impide el retorno del gas al exterior.

7. MANÓMETRO

Es un indicador de presión instalado entre los depósitos de almacenamiento y el regulador de presión, que permite medir e indicar la presión de almacenamiento del gas natural.

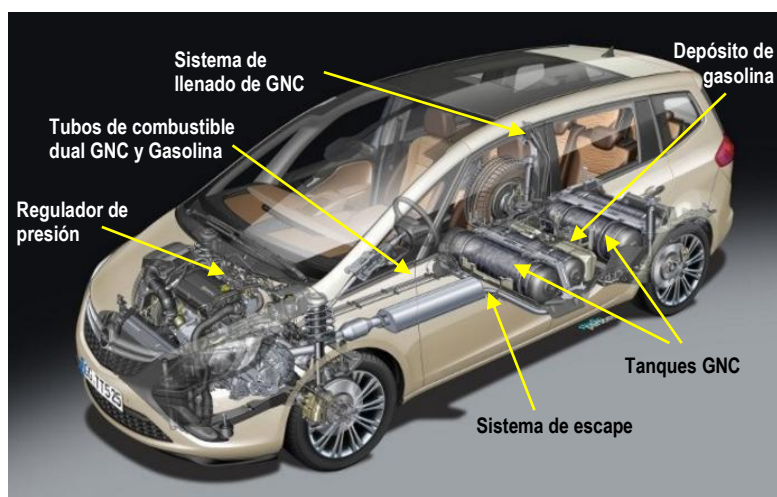


Ilustración 10. Elementos del sistema en un vehículo bi-fuel [Basshuysen, 2016]

3.3.2 Alimentación del combustible

La alimentación del gas natural al motor para su combustión se realiza a través del circuito de alimentación. Este circuito, que se inicia en el sistema de almacenamiento, finaliza con la inyección del combustible en el colector de admisión o en la cámara de combustión (Ilustración 11 e Ilustración 12).

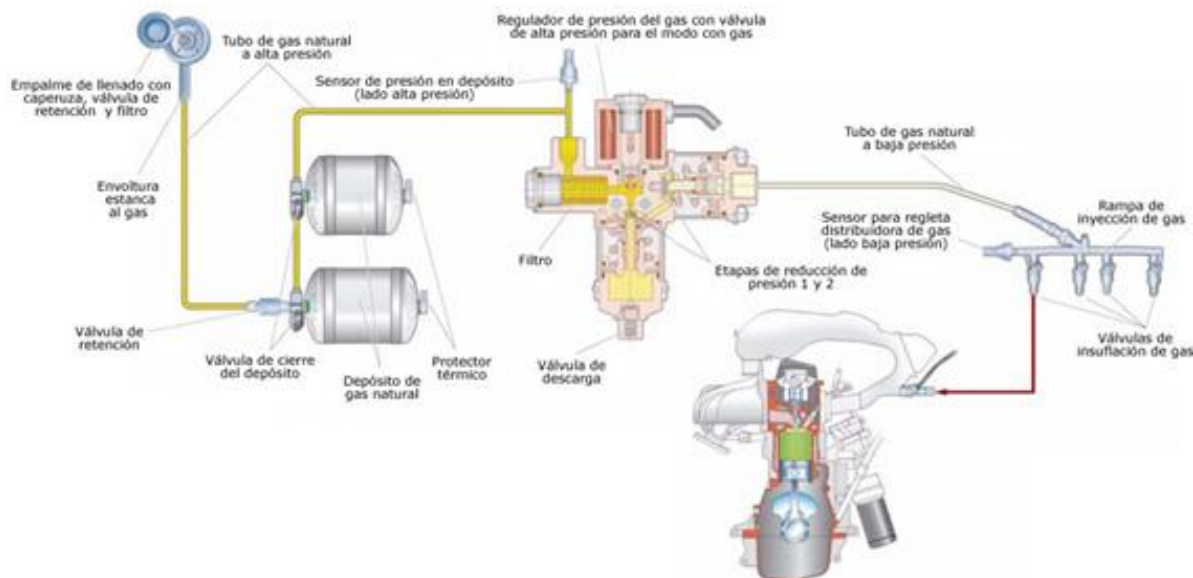


Ilustración 11. Esquema del sistema de alimentación de GNC del Volkswagen Golf Bi-Fuel

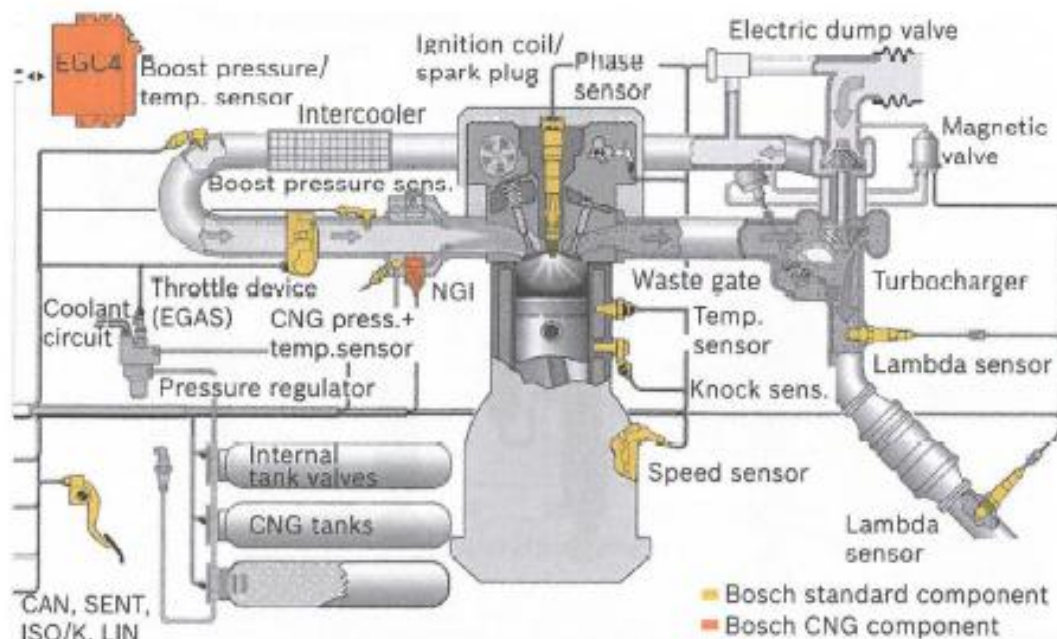


Ilustración 12. Sistema de encendido por chispa para vehículos de gas natural [Bosch, 2015]

Existen diversos tipos de configuraciones sobre la manera de realizar la inyección. En el caso del gas natural, las principales opciones son las siguientes.

- **Inyección directa:** El gas natural se inyecta directamente sobre la cámara de combustión, por lo que el volumen ocupado por el combustible no influye sobre la cantidad de aire que entra a la cámara de combustión. Se encuentra en desarrollo un sistema de inyección directa multipunto de baja presión que inyecta el combustible más o menos tarde en el ciclo de trabajo según el nivel de presión (Ilustración 13).

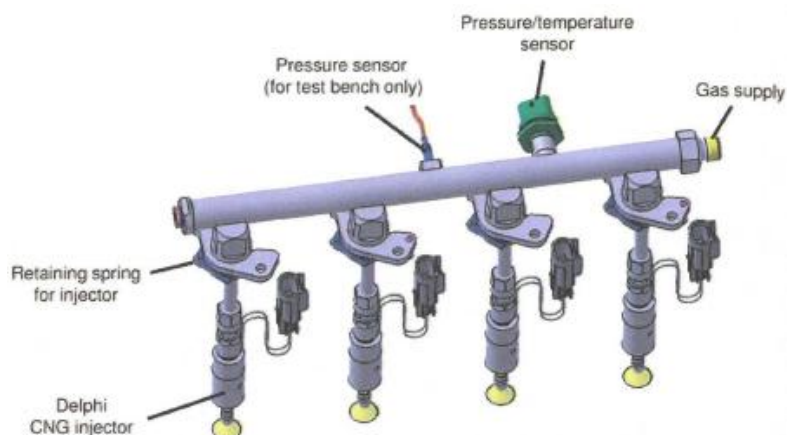


Ilustración 13. Inyección directa a baja presión [Delphi]

- **Inyección indirecta (multipunto):** La inyección del combustible en el colector de admisión (Ilustración 14) favorece la formación de la mezcla. Una mezcla más homogénea, pudiendo ajustar la relación estequiométrica, permite un mejor funcionamiento del catalizador de 3 vías a la hora de convertir las emisiones contaminantes (al trabajar con $\lambda \sim 1$, donde se sitúa la ventana operacional del catalizador [Gráfico 11]). Se trata de la mejor opción por su relación coste beneficio. En la Ilustración 15 se muestra un inyector multipunto.

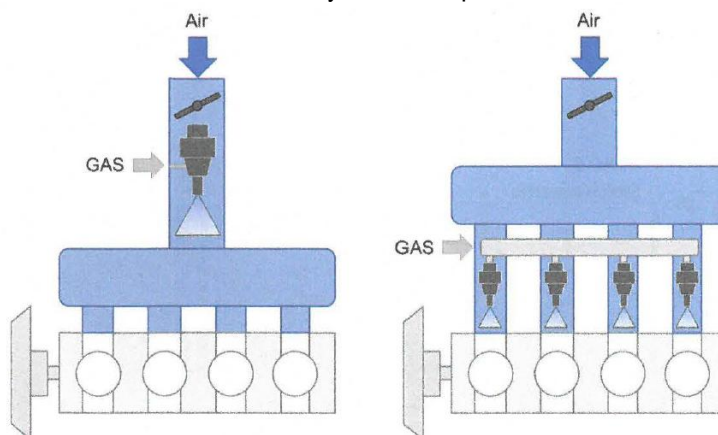


Ilustración 14. Inyección central del gas (izquierda) e inyección multipunto (derecha) [Basshuysen, 2016]

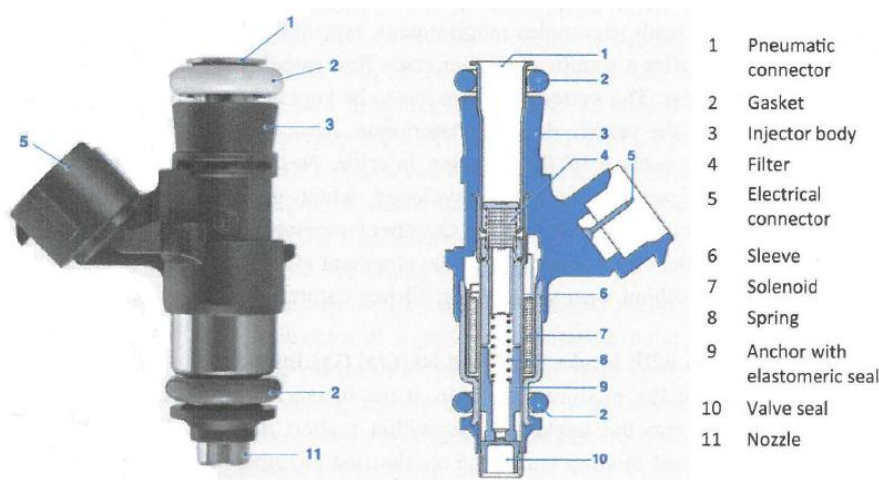


Ilustración 15. Inyector multipunto de gas natural [Bosch]

- **Mezclador en colector.** El uso de un mezclador en el colector de admisión presenta la ventaja de lograr una buena homogeneización de la mezcla, pero cuenta con la desventaja de los transitorios, en los que la mezcla permanece almacenada en el mezclador. Por lo tanto, no es deseable.

En el caso de configuraciones bi-fuel, es común combinar inyección directa para la gasolina e inyección indirecta para el gas natural (Ilustración 16).

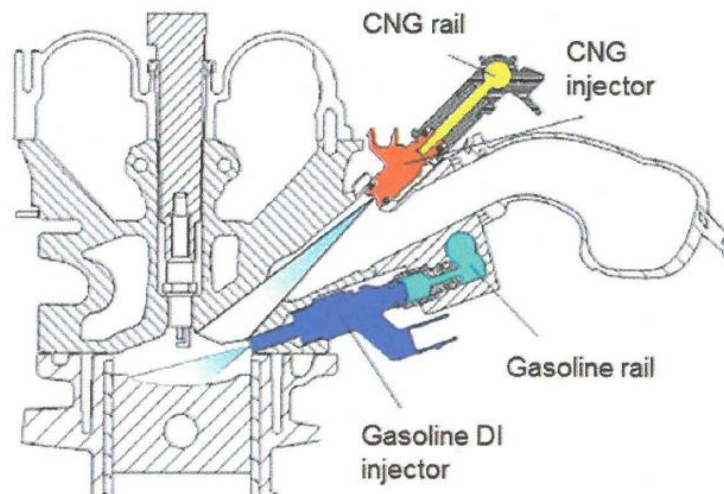


Ilustración 16. Sistema de inyección de combustible de un motor bi-fuel gasolina-GNC [Basshuysen, 2016]

3.3.3 Sistema de Control

El sistema de control del vehículo tras la conversión para el empleo de gas natural comprimido debe contar con nuevos sensores y actuadores que permitan controlar el comportamiento del sistema.

Si se trata de un vehículo bi-fuel que pueda funcionar con gas natural y gasolina, el sistema contará con interruptores que permitan seleccionar el combustible a emplear y displays que muestren la selección. Del mismo modo, se tendrá que actuar sobre los elementos del circuito del combustible seleccionado y mantener cerrados los del combustible que no está siendo empleado.

En el caso de estudio, con una configuración monovalente para uso exclusivo de gas natural comprimido, será necesario emplear sensores de alta presión y de temperatura, para conocer las condiciones en los depósitos de almacenamiento y en los raíles de alimentación de combustible a los colectores. Será preciso actuar sobre los reguladores de presión del sistema de almacenamiento, las válvulas de apertura de los tanques y los inyectores de gas natural comprimido (Diagrama 2).

El resto de sensores y actuadores propios del sistema de control de un motor de combustión se mantienen.

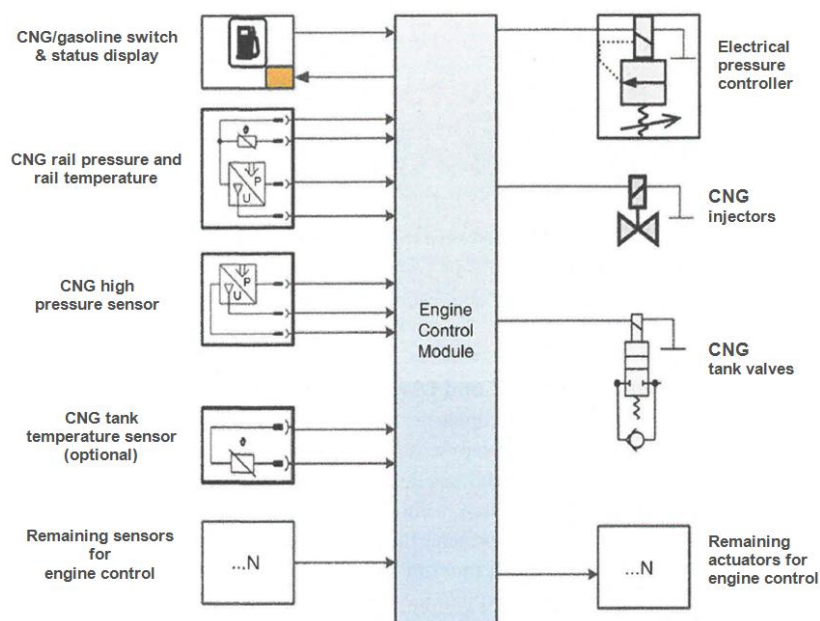


Diagrama 2. Esquema del sistema de control de un motor bi-fuel gasolina-GNC [Basshuysen, 2016]

3.4 Equipamiento de repostaje

Los equipamientos de repostaje de gas natural comprimido se encuentran regulados por normas europeas, en busca de estandarizar toda la red de suministro en el continente. Todos los equipamientos se encuentran normalizados y estandarizados.

Las normas EN 13683 y EN 13945 regulan el suministro de gas natural comprimido a los vehículos, las estaciones de servicio, los equipos de llenado del depósito y las condiciones de operación, además de los requisitos de seguridad en las instalaciones de repostaje.

El Real Decreto 919/2006 es el encargado de normalizar los sistemas de repostaje en España, con sistemas de llenado estandarizado, como el estándar NGV1 para llenado de combustibles gaseosos en turismos.



Ilustración 17. Manguera de llenado de GNC según el estándar NGV1

Existen dos sistemas diferentes para el repostaje de gas natural en el vehículo:

- **Sistemas de carga rápida** (Ilustración 18): Poseen estación de regulación y medición, sistemas de compresión y secado, cilindros para el almacenamiento del gas natural comprimido y surtidores. El gas natural es comprimido previamente y almacenado en la estación, de manera que el repostaje se produce por la diferencia de presión entre los cilindros de la estación y los depósitos del vehículo. El tiempo de repostaje es de escasos minutos.
- **Sistemas de carga lenta**: No hay almacenamiento en la propia estación, sino que el gas se comprime a medida que se inyecta en el depósito del vehículo. Es más económico, pero conlleva un elevado tiempo de recarga, por lo que se limita al uso en flotas de vehículos que permanecen estacionados largos periodos del día.

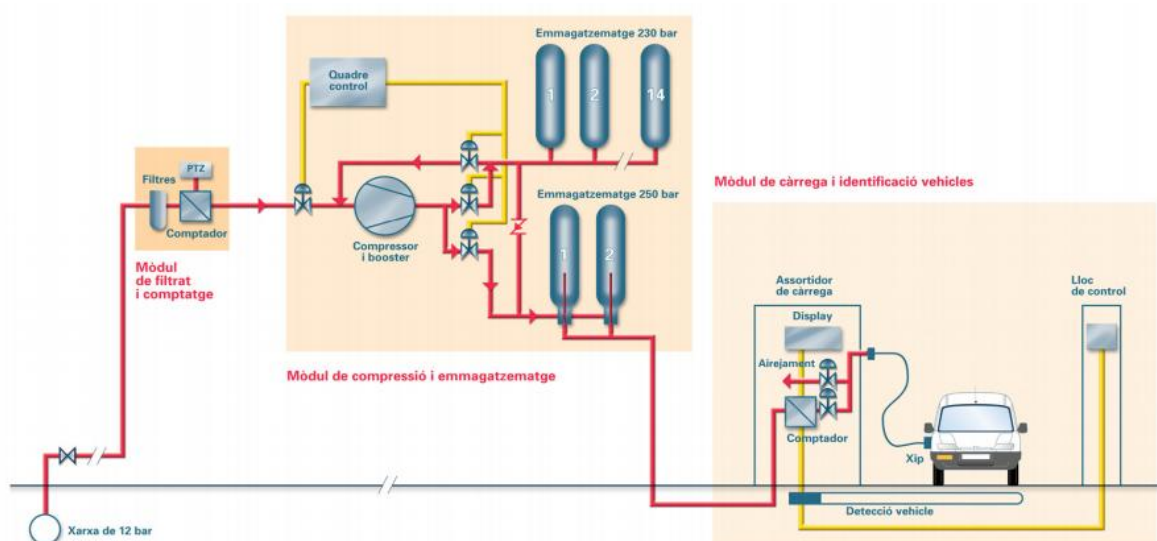


Ilustración 18. Sistema de carga de GNC [Gas Natural Fenosa, 2016]

España cuenta actualmente con 42 estaciones de servicio de carga rápida para uso público, donde es posible repostar gas natural comprimido.

PROCEDIMIENTO DE REPOSTAJE

El repostaje puede realizarlo el usuario, la estaciones cuentan con sistemas de fácil empleo, aunque requieren del conocimiento para cumplir con todos los requisitos de seguridad. El repostaje es similar al de gasolina o gasóleo, y se deben tomar las mismas precauciones: apagar el motor y el sistema de iluminación, no fumar ni provocar chispas...

El procedimiento para el repostaje requiere descolgar la manguera del surtidor y acoplarla en la toma de carga del vehículo. El suministro no podrá realizarse hasta que todas las conexiones sean completamente estancas y se produzcan todas las conexiones de seguridad [Gas Natural Fenosa]. Existen dos tipos de conexiones de seguridad:

- Mangueras con palanca. Cuentan con una palanca que deberá girarse 180° una vez acoplada la manguera en la toma de carga. Tras el accionamiento de la palanca, la válvula de seguridad se libera para permitir la entrada de combustible.
- Mangueras con pistola. Al presionar el gatillo, el seguro se libera permitiendo el paso de combustible.

El sistema cuenta también con pulsadores Start y Stop, para iniciar la carga si se cumplen todos los requisitos y para detenerla en cualquier momento. Si la manguera se desacopla accidentalmente, el suministro se corta de manera inmediata.

La composición del gas natural suministrado en la red nacional varía frecuentemente en función de las calidades y lugares de origen. Puede servir de ejemplo la composición suministrada en Valladolid en abril de 2011, que será la referencia para los cálculos del presente trabajo y que se muestra en la Tabla 5.

3.5 Emisiones de CO₂

En lo referente a emisiones de CO₂, el gas natural presenta la ventaja de estar compuesto en su gran mayoría por metano, el hidrocarburo con el mínimo factor de emisiones de CO₂ (relación m/n = 4).

Las emisiones de CO₂ pueden hallarse directamente, ya que únicamente dependerán del consumo de combustible del vehículo y de la naturaleza y composición del combustible. Se realizará el cálculo de la cantidad de CO₂ emitido tanto por unidad de masa quemada como de energía liberada.

CÁLCULO EMISIONES DE CO₂

$$\frac{m_{\text{CO}_2\text{-gasolina}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = \frac{m_{\text{gasolina}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) \cdot e_{\text{CO}_2 \text{ gasolina}} \left(\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{g}_{\text{gasolina}}} \right)$$

$$\frac{m_{\text{CO}_2\text{-GN}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = \frac{m_{\text{GN}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) \cdot e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{g}_{\text{GN}}} \right)$$

Gasolina:

El factor de emisiones para una composición estándar será:

$$e_{\text{CO}_2 \text{ gasolina}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g gasolina}} \right) = \frac{44}{12 + \frac{m}{n} + 16 \frac{p}{n}} = 3.083 \frac{\text{g CO}_2}{\text{g gasolina}}$$

Tomando los valores que se desarrollarán en el capítulo 4:

- Consumo en 100 km: 5.4 L/100km
- Valor de la densidad de la gasolina: $\rho_{\text{gasolina}} = 0.72 \text{ kg/L}$

$$\frac{m_{\text{CO}_2\text{-gasolina}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = 3.083 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{g}_{\text{gasolina}}} \cdot 5.4 \frac{\text{L}}{100\text{km}} \cdot 0.72 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 120 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{km recor.}}$$

Gas natural:

Se supondrá la combustión completa del hidrocarburo con la composición siguiente, que será el empleado a lo largo del presente trabajo:

Compuesto	M (g/mol)	Fracción molar X	C	H	CO ₂ Inertes	N ₂ Inertes
Nitrógeno (N ₂)	28,0	0,01094	-	-	-	0,0109
Diox. Carbono (CO ₂)	44,0	0,02027	-	-	0,0203	-
Metano (CH ₄)	16,0	0,85782	0,8578	3,4313	-	-
Etano (C ₂ H ₆)	30,1	0,09387	0,1877	0,5632	-	-
Propano (C ₃ H ₈)	44,0	0,01420	0,0426	0,1136	-	-
i-Butano (C ₄ H ₁₀)	58,1	0,00114	0,0046	0,0114	-	-
n-Butano (C ₄ H ₁₀)	58,0	0,00134	0,0054	0,0134	-	-
i-Pentano (C ₅ H ₁₂)	72,0	0,00023	0,0012	0,0028	-	-
n-Pentano (C ₅ H ₁₂)	72,0	0,00016	0,0008	0,0019	-	-
n-Hexano (C ₆ H ₁₄)	86,0	0,00003	0,0002	0,0004	-	-
TOTAL			1,10021	4,138	0,0203	0,0109
			1	3,761	0,0184	0,0099

Tabla 8. Moles de C, H, CO₂ y N₂ en la composición del combustible

En primer lugar, se calculará el número de moles de carbono (C), hidrógeno (H), inertes de CO₂ e inertes de N₂ que hay en 1 mol de gas natural con la composición indicada.

Así, habrá 1 C y 4 H en cada mol de metano, 2 C y 6 H en cada mol de etano, 3 C y 8 H en cada mol de propano, 4 C y 10 H en cada mol de butano, 5 C y 12 H en cada mol de pentano y 6 C y 14 H en cada mol de hexano.

Del mismo modo se tienen los inertes de CO₂ y N₂.

Se simplifica dividiendo los 4 valores entre los moles obtenidos de C para tener n=1

$$e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right) = \frac{n \cdot M_{\text{CO}_2} + \text{inertes CO}_2}{(n \cdot M_{\text{C}} + m \cdot M_{\text{H}}) + \text{inertes}(\text{CO}_2 + \text{N}_2)}$$

$$e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right) = \frac{1 \cdot 44 + 0,0184 \cdot 44}{(1 \cdot 12 + 3,7611 \cdot 1) + 0,01842 \cdot 44 + 0,0099 \cdot 28} = 2,659 \frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}}$$

Se puede comprobar fácilmente como varía el coeficiente de emisiones de CO₂ ante variaciones en la cantidad de inertes en el gas natural.

Si eliminásemos los inertes del combustible, se obtiene un dato que inicialmente puede resultar ilógico, pues el factor de emisiones aumenta hasta 2.792 gCO₂/gGN. Sin embargo, no debe olvidarse que este factor representa la masa de CO₂ emitida por masa de combustible consumida, por lo que para obtener una visión real del comportamiento de los inertes debemos representarlo en masa de CO₂ respecto al poder calorífico del combustible.

De este modo se observa claramente cómo con la supresión de los inertes, el factor de emisiones respecto al poder calorífico se reduce:

$$e_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{kJ}} \right) = \frac{e_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right)}{H_c \left(\frac{\text{kJ}}{\text{g GN}} \right)}$$

Composición inicial del combustible con inertes:

$$e_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{kJ}} \right) = \frac{2,659 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right)}{46,225 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{g GN}} \right)} = 0,0575 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kJ}}$$

Composición del combustible eliminando los inertes y manteniendo las proporciones del resto de componentes: Al suprimirse los inertes, el resto de componentes aumenta manteniendo la misma relación entre ellos, obteniéndose un poder calorífico (ver hojas de cálculo anexas) de $49.411 \frac{\text{kJ}}{\text{g GN}}$

$$e_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{kJ}} \right) = \frac{2.792 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right)}{49.411 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{g GN}} \right)} = 0.0565 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kJ}}$$

Por tanto, tomando el dato del factor de emisiones para el gas natural $2.659 \text{ gCO}_2/\text{gGN}$ y el consumo de gas natural por kilómetro, que se calculará en el capítulo 4, se tendrá:

$$\frac{m_{\text{CO}_2-\text{GN}}}{L} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = \frac{3.66}{100} \left(\frac{\text{kg}}{\text{km}} \right) \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \cdot 2.659 \left(\frac{\text{gCO}_2}{\text{gGN}} \right) = 97.3 \frac{\text{g CO}_2}{\text{km recorrido}}$$

Esta cifra supone una reducción respecto al equivalente de gasolina de prácticamente un 20%:

$$\frac{120 - 97,3}{120} \cdot 100 = 19,41 \%$$

Huella de carbono. Emisiones Well to Tank y Well to Wheel

Las emisiones "well to tank" requieren considerar también la generación de CO_2 en los procesos anteriores al repostaje del gas natural en el vehículo. Dependen de numerosos factores, como los lugares y medios de obtención, o el transporte hasta el punto de consumo (Ilustración 19).

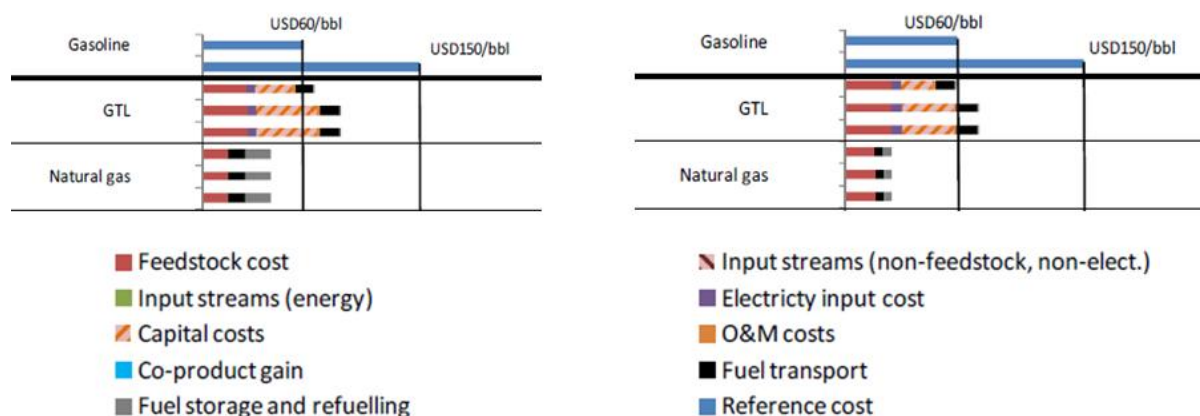


Ilustración 19. Comparativa de los costes de producción y transporte entre gas natural y gasolina, para un escenario actual (izquierda) y un futuro escenario maduro (derecha) [International Energy Agency, 2013]

Según los datos ofrecidos por el JRC Technical Reports, en 2014, el factor de emisiones well to tank, en gramos de CO_2 equivalente por unidad de energía final (MJ), para gasolina y el Mix europeo de gas natural (se toman como semejantes a la composición de referencia) son las siguientes:

$$\left[e_{\text{CO}_2 \text{ gasolina}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right) \right]_{\text{Well to Tank}} = 13.8 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

$$\left[e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right) \right]_{\text{Well to Tank}} = 13.0 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

Los factores de emisiones durante la combustión (tank to wheel) son los calculados en el anterior apartado. Expresándolos por unidad de energía se tiene:

$$\left[e_{\text{CO}_2 \text{ gasol.}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right) \right]_{\text{Tank to Wheel}} = \frac{e_{\text{CO}_2 \text{ gasol.}} \left(\frac{\text{gCO}_2}{\text{gGN}} \right)}{PCI_{\text{gasol.}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{gGN}} \right)} = \frac{3.083 \left(\frac{\text{gCO}_2}{\text{gGN}} \right)}{0.043 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{gGN}} \right)} = 71.7 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

$$\left[e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right) \right]_{\text{Tank to Wheel}} = \frac{e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right)}{PCI_{\text{GN}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{g GN}} \right)} = \frac{2.659 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g GN}} \right)}{0.046225 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{g GN}} \right)} = 57,5 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

Las emisiones well to wheel, por unidad de energía final serán las resultantes de la suma de ambos factores:

$$[e_{\text{CO}_2 \text{ gasol}}]_{\text{WtT}} = [e_{\text{CO}_2 \text{ gasol}}]_{\text{WtT}} + [e_{\text{CO}_2 \text{ gasol}}]_{\text{TtW}} = 85,5 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

$$[e_{\text{CO}_2 \text{ GN}}]_{\text{WtT}} = [e_{\text{CO}_2 \text{ GN}}]_{\text{WtT}} + [e_{\text{CO}_2 \text{ GN}}]_{\text{TtW}} = 70,5 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)$$

Supuesto que el rendimiento del vehículo desde el tanque a la rueda es el mismo para el motor de gasolina y de gas natural, la relación de emisiones por unidad de longitud recorrida será igual a la relación de los factores well to wheel.

$$\left[\frac{m_{\text{CO}_2 \text{ GN}} / L \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{km}} \right)}{m_{\text{CO}_2 \text{ Gasol.}} / L \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{km}} \right)} \right]_{\text{WtW}} = \left[\frac{e_{\text{CO}_2 \text{ GN}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)}{e_{\text{CO}_2 \text{ gasol.}} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}} \right)} \right]_{\text{WtW}} \cdot \frac{\eta_{\text{gasol.}}}{\eta_{\text{GN}}} = \frac{70,5}{85,5}$$

3.6 Otras emisiones contaminantes

Los motores que emplean gas natural presentan bajas emisiones de CO y compuestos orgánicos volátiles y prácticamente nulas emisiones de partículas. Durante el arranque en frío, al no ser necesario enriquecer la mezcla, las emisiones también son reducidas.

Estos aspectos convierten al gas natural en un combustible óptimo para responder a las crecientes exigencias medioambientales.

El gas natural emite un 60-80% menos de monóxido de carbono (CO) y entre un 50-80% menos de óxidos nitrosos (NOx) que un vehículo gasolina, y un 70-90% menos de CO y un 80-90% de NOx que un vehículo equivalente de gasóleo. Además, no genera azufre, partículas, trazas de plomo ni otros metales pesados y menores niveles de emisiones tóxicas aún no reguladas (BTX [benceno, tolueno y xileno], formaldehídos, aromáticos, olefinas, benzaldehídos o gases orgánicos sin contenido de metano).

Respecto a las emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC), las cifras pueden ser similares, con posibles aumentos de las emisiones de metano, sin embargo, como se verá a continuación, los vehículos con motores monovalentes de gas natural comprimido incorporan catalizadores de tres vías optimizados para la reducción, en un 90%, del metano residual.

Si a todo ello se añade la reducción de emisiones de CO₂, próxima al 20% calculado en el apartado anterior, se puede describir al gas natural como un hidrocarburo limpio.

El funcionamiento del motor con el empleo de gas natural comprimido es más suave y silencioso, reduciendo en gran medida la contaminación acústica, problema cada vez más acentuado en las principales ciudades.

TRATAMIENTO GASES DE ESCAPE

El Renault Captur Energy TCe 90 CV, emplea una catalizador de tres vías para el control de emisiones.

Como se muestra en el Gráfico 11, si la conversión a gas natural comprimido emplea mezcla estequiométrica, puede continuarse el uso del catalizador de 3 vías, ya que tiene una ventana operacional situada en torno a un exceso de aire λ de 0.99, equivalente a un dosado relativo F_r de 1.01.

Sin embargo, requerirá entre 3 y 4 veces la carga del catalizador que para un equivalente de gasolina.

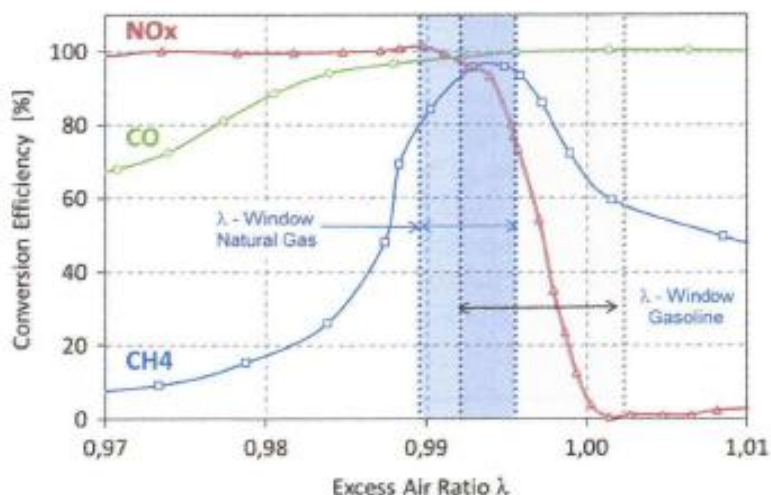


Gráfico 11. Ventana operacional para un motor GNC con catalizador de tres vías [Basshuysen, 2016]

Si por el contrario, se pretende usar una mezcla pobre en aras de mejorar el rendimiento ($F_r=[0.6-0.7]$, $\lambda=[1.42-1.67]$), habrá que recurrir a un catalizador de oxidación para eliminar CO y HC sin quemar y a un catalizador acumulador para eliminar los NOx.

El uso del catalizador de tres vías para la conversión de los hidrocarburos sin quemar requerirá mayor temperatura en el caso del gas natural que en el de gasolina, tal y como puede verse en el Gráfico 12. Esto puede suponer un problema, ya que como se ha visto en anteriores apartados, la temperatura de los gases de escape es inferior a la del motor gasolina.

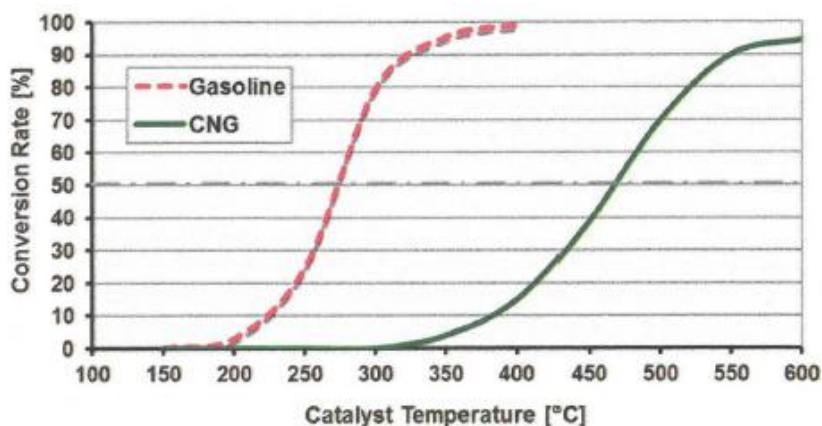


Gráfico 12. Conversión catalítica de emisiones de hidrocarburos [HC] para gasolina y GNC [Basshuysen, 2016]

En el Gráfico 13 se aprecia el efecto del envejecimiento del catalizador. La curva se va desplazando a la derecha, requiriéndose mayor temperatura en el catalizador para lograr la plena conversión del metano.

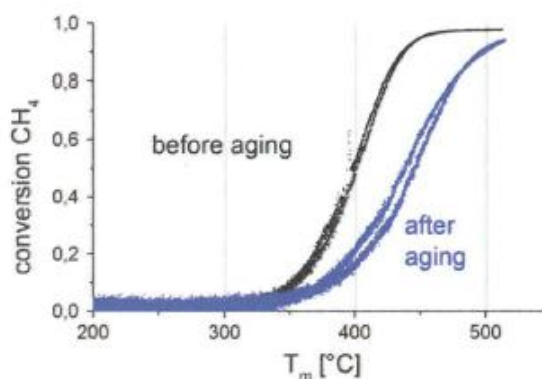


Gráfico 13. Efecto del envejecimiento en la temperatura necesaria para la conversión del metano [Basshuysen, 2016]

En lo referente a las emisiones de partículas, como se ha expuesto anteriormente, el gas natural presenta unos excelentes resultados. Como muestra el Gráfico 14, las emisiones de partículas de un motor alimentado con gas natural están muy por debajo del equivalente de gasolina, y por supuesto, de cualquier motor diesel.

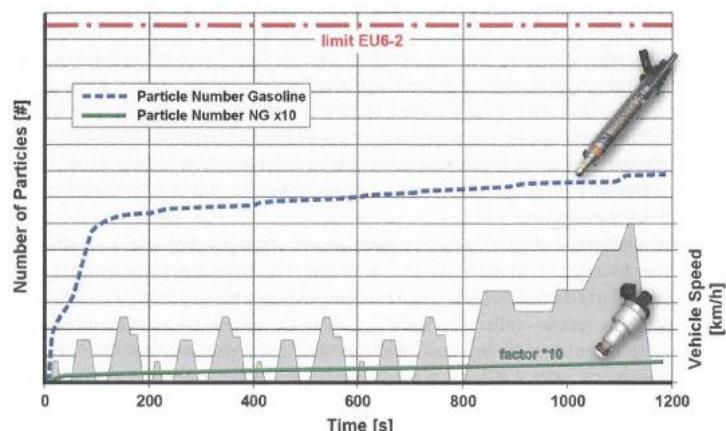


Gráfico 14. Emisiones de partículas para el motor "Mercedes Benz M270/274 a GN" en el NEDC [Basshuysen, 2016]

EGR

Otro de los métodos a emplear para la reducción de las emisiones contaminantes es la recirculación de los gases de escape. La recirculación de gases de escape permite reducir principalmente las emisiones de NOx, aunque presenta la desventaja de elevar las emisiones de partículas. Por ello es necesario llegar a un compromiso de actuación.

En el Gráfico 15 puede observarse cómo, en el caso de los diesel, es necesario llegar a un compromiso entre las emisiones de partículas y de NOx. El GNC, en caso de emplear mezcla rica, cumple con los límites EURO5 en cuanto a partículas y NOx sin necesidad de tratamiento tras el escape. En caso de mezcla estequiométrica, sí se requiere tratamiento para la reducción de NOx. De no ser suficiente con la actuación del catalizador de 3 vías, puede recurrirse a emplear recirculación de gases de escape sin temor a que las partículas superen los límites admisibles.

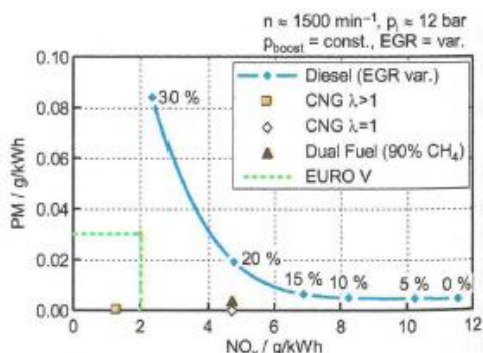


Gráfico 15. Trade-off partículas-NOx [IVT, TU Graz]

La adición de H₂ en la mezcla puede resultar también muy beneficiosa para la eficiencia de conversión con recirculación de los gases de escape.

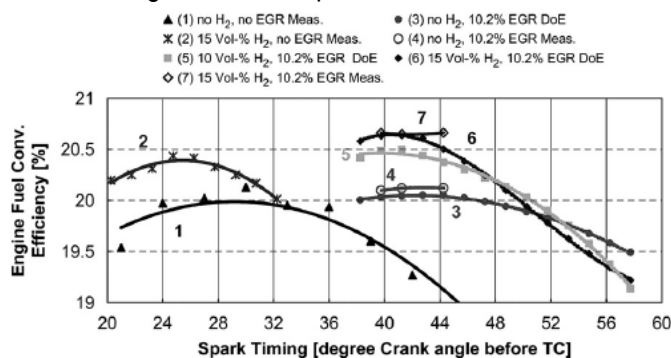


Gráfico 16. Eficiencia de conversión para varias mezclas GN-H₂ y ratios de EGR [Korakianitis, 2010]

3.7 Seguridad

La seguridad es una de las principales preocupaciones de muchos usuarios de automóviles, y en el caso de un vehículo propulsado por gas natural comprimido, las dudas aumentan en lo referente al sistema de almacenamiento del combustible.

Sin embargo, estas dudas no presentan ningún fundamento, ya que un turismo a GNC puede considerarse más seguro que uno a gasolina. Los tanques de GNC son especialmente diseñados con una gran resistencia y es más difícil que sufran daños en caso de accidente que en un depósito de gasolina.

SEGURIDAD EN CASO DE ACCIDENTES

Las medidas de seguridad adicionales que se aplican para el almacenamiento y utilización del gas natural, mucho más exigentes que en el caso de la gasolina, conducen a que los vehículos GNC puedan considerarse tanto o más seguros que los vehículos tradicionales en caso de accidente. Estos son algunos de los factores que conducen a tal afirmación:

Las bombonas de CNG son mucho más resistentes a impactos que los depósitos de gasolina. De producirse una rotura, el gas se liberaría bruscamente, pero sin llegar a incendiarse.

La inspección periódica obligatoria de los tanques de GNC permite controlar su deterioro, algo que no ocurre con los depósitos de gasolina.

Elementos de seguridad en los depósitos para evitar la explosión en caso de incendio: válvulas limitadoras de presión, válvulas de corte de la alimentación en caso de rotura o parada del motor...

Depósitos, conducciones y resto de elementos del sistema van sellados para evitar fugas.

El gas natural presenta un intervalo de inflamabilidad entre 5-15% de porcentaje en el aire, frente al intervalo 1-16% para la gasolina, además de una mayor temperatura de autoinflamación: 600°C frente a los 315°C para la gasolina.



Ilustración 20. Vehículo sin ocupantes accidentado, sin daños en los depósitos de almacenamiento de gas natural comprimido [Basshuysen, 2016]

Siguiendo la normativa europea ECE R110, los depósitos de GNC no deberán sufrir daños tras un impacto, por lo que será condición necesaria para la homologación del vehículo. El sistema de almacenamiento de combustible no tendrá que sufrir ningún tipo de daño en los ensayos de choque (*crash tests*) para homologación, superando los 3 ensayos contemplados en la norma europea para todos los vehículos turismo (comunes con los vehículos de combustibles tradicionales):

- Impacto frontal a 65 km/h con offset 40% contra barrera deformable.
- Impacto lateral de barrera deformable de 950 kg a 50 km/h.
- Impacto trasero con barrera rígida de 1800 kg a 54 km/h.

Los fabricantes de vehículos pueden además definir otros ensayos de choque para evaluar su sistema de almacenamiento de gas natural: como el impacto lateral de un poste en zonas especialmente conflictivas para el sistema, o modificando el impacto trasero para comprobar la afectación sobre los tanques dispuestos en la parte trasera del vehículo.



Ilustración 21. Impacto frontal offset 40% contra barrera deformable (izquierda) e impacto lateral de barrera deformable (derecha)

CONDICIONES DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

En lo referente a los tanques de almacenamiento, al tratarse de un gas presurizado y con riesgo de inflamación, los vehículos de gas natural deben cumplir con exigentes normativas de calidad y seguridad. El ya mencionado reglamento europeo ECE R110 define las condiciones que debe cumplir la instalación de gas natural comprimido en un vehículo, especialmente los tanques de almacenamiento. Existen una serie de precauciones de seguridad que se detallan a continuación:

- Inspección periódica de los cilindros (reglamento ECE R110)
- Evitar exposición de conexiones eléctricas y asegurar la sujeción de cables y mangueras.
- Ha de realizarse un buen mantenimiento del compresor y filtros de la estación de repostaje, para evitar el arrastre de aceite lubricante del compresor.

En el caso de los conductos de combustible, estos están realizados con acero inoxidable con un excelente comportamiento dúctil en caso de impacto. Los puntos especialmente conflictivos son las uniones y las conexiones con las distintas válvulas.

Del mismo modo, las válvulas son los puntos más vulnerables del sistema, por lo que se buscan dispositivos y estructuras para protegerlas en caso de impacto.

POSIBLES FUGAS

Una cuestión que suscita temor entre los usuarios son las posibles fugas de gas en espacios cerrados, como garajes, parkings subterráneos o instalaciones de repostaje o mantenimiento. Es importante que estos recintos dispongan de sistemas de ventilación.

El gas natural incorpora una sustancia odorizante para permitir detectar su presencia en concentraciones superiores al 0,3%. Además, es menos denso que el aire y volátil, así que en caso de fuga se libera, dispersa y ventila con gran facilidad. Es difícil que se acumule dentro de un recinto cerrado, aunque siempre hay que asegurar que éste cuente con ventilación, bien sea de forma natural o forzada. Puede existir un mayor riesgo de accidentes en garajes sin ventilación; cuando la ventilación no sea por la parte más alta, o cuando se realice sólo en función de la presencia de CO.

El rango de inflamabilidad del gas natural es menor que el de la gasolina: gasolina puede entrar en ignición en proporciones entre el 1 y el 16% respecto al aire, mientras que en el gas natural sólo se produce entre el 5 y el 15%. Por tanto, ante una fuga, el rango de inflamabilidad del gas natural es menor que en gasolina.

SEGURIDAD EN EL REPOSTAJE

La seguridad en los sistemas repostaje está completamente regulada y controlada por diversas normativas europeas e internacionales. Cuentan con numerosos sistemas para impedir fugas de combustible a la atmosfera durante la recarga: Palancas y gatillos de seguridad que se accionan sólo tras el perfecto acoplamiento de la boquilla a la válvula de llenado; botones Start/Stop para aprobar el inicio del repostaje; y elementos de seguridad para la desactivación inmediata de la carga en caso de desacoplamiento de la manguera. Las mangueras homologadas son totalmente estancas para evitar fugas.

3.8 Normativa

El uso del gas natural como combustible vehicular está regulado por diversas normativas de diferentes estamentos, como el Comité Europeo de Normalización (CEN) o la Organización Internacional de Normalización (ISO). Pueden distinguirse en varios grupos, entre los que destacan las normativas de seguridad, las normativas para la regulación de emisiones y las normativas que recogen las condiciones de obligado cumplimiento en los equipos de gas natural vehicular (ECE R110) y las transformaciones a realizar en los vehículos (ECE R115).

A continuación se realizará un repaso de las principales normativas de aplicación en el ámbito de estudio del presente trabajo:

NORMAS REGULADORAS DE LA RED DE ESTACIONES DE SERVICIO [CEN (EN 13683 y EN 13945) Y REAL DECRETO 919/2006]

Regulan el suministro de gas natural comprimido a los vehículos, las estaciones de servicio, los equipos de llenado del depósito y las condiciones de operación.

Se ocupan también de los requisitos de seguridad en las instalaciones de repostaje y en las operaciones con gas natural, y de sistemas de alimentación de gas natural en el vehículo.

El Real Decreto 919/2006 es el encargado de normalizar los sistemas de repostaje en España, como el estándar de llenado NGV1 para combustibles gaseosos en turismos.

NORMAS REGULADORAS DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE GNC Y DE LA COMPOSICIÓN Y CALIDAD DEL GAS NATURAL [ISO]

- ISO TC58/SC3: Depósitos de gas en vehículos.
- ISO TC193: Composición del gas natural.
- ISO/DIS 11439: Cilindros a alta presión para almacenaje de gas natural como combustible para vehículos.
- ISO/TR 15403: Calidad del gas natural para uso como carburante.
- ISO 15500: Componentes del sistema de alimentación de CNG.
- ISO/DIS 15501: Requisitos de seguridad y métodos de ensayo para los sistemas de alimentación de CNG.
- ISO 14469: Sistemas de conexión para el llenado de depósitos de CNG.
- ISO/DIS 19078: Inspección de depósitos de CNG en el vehículo.

REGLAMENTO ECE R110

El reglamento europeo encargado de la homologación de los equipos y de asegurar las condiciones para su funcionamiento es el ECE R110.

Establece las condiciones de servicio de la instalación en el vehículo, las condiciones del diseño, las restricciones que deben cumplir los depósitos de almacenamiento y los ensayos pertinentes para su homologación.

Establece las condiciones de servicio de los depósitos de almacenamiento, con una presión de 200 bar y una temperatura estabilizada de 15°C. Marca las revisiones periódicas y la vida útil de los depósitos, así como las pautas de revisión tras colisión.

De igual modo, establece los materiales aceptados para su uso en el sistema de almacenamiento.

También recoge todos los ensayos necesarios para la homologación de botellas metálicas de GNC: análisis de esfuerzos, requisitos de los ensayos de fabricación y producción, ensayos de calificación del diseño de las botellas, ensayos de ciclos de presión a temperatura ambiente, ensayo de rotura por presión hidrostática, ensayo de fuego.

REGLAMENTO ECE R115

Es el reglamento encargado de marcar las directrices para la homologación de un sistema de adaptación al GLP o GNC. El reglamento indica todas las condiciones de ensayo para la pertinente homologación de un vehículo tras su conversión para el uso de GNC, así como los requisitos para la instalación de los nuevos equipos, como la correcta fijación de los recipientes de combustible.

INSPECCIÓN TÉCNICA DE VEHÍCULOS

Los vehículos que emplean gas natural comprimido como combustible se ven sometidos a la misma inspección que el resto, con la excepción del control y verificación del correcto estado de las bombonas de combustible dentro del periodo estipulado.

SEGURIDAD

Tal y como se ha expresado en el capítulo anterior, la normativa de seguridad a lo hora de la homologación es común al resto de vehículos, viéndose sometidos al mismo tipo de ensayos de impacto.

Otros factores en materia de seguridad son los recogidos en los Reglamentos ECE R110 y R115, en lo referente al correcto estado de las instalaciones y el cumplimiento de las revisiones periódicas de los elementos del sistema que lo requieran.

La seguridad en el repostaje también está regulada por las normativas referentes al uso y explotación de estaciones de servicio.

EMISIONES CONTAMINANTES EN EL ESCAPE

Los ensayos pertinentes para la homologación de emisiones contaminantes de los vehículos convertidos para el uso de GNC son contemplados por el reglamento ECE R115.

Ha de cumplir la Directiva 2005/55/CE, sobre las medidas a adoptar contra la emisión de gases y partículas contaminantes.

Del mismo modo, los vehículos de gas se ven sometidos al cumplimiento de la norma EURO en vigor en el momento de la homologación del vehículo. El vehículo Renault Captur Energy TCe 90 se homologó según el estándar EURO5, sin embargo, también cumpliría los requerimientos del estándar EURO6.

En el caso de la norma EURO 6, las limitaciones de los motores de gas natural comprimido son las mismas que para un motor gasolina o un motor GLP.

En la siguiente tabla se observa cómo es de restrictiva la norma EURO 6 con los motores de encendido provocado de gasolina y sus variantes, entre las que se incluye el GNC.

Categoría	Clase	Masa de referencia (MR) (kg)	Valores límite de la norma Euro 6											
			Masa de monóxido de carbono (CO)		Masa total de hidrocarburos (HCT)		Masa de hidrocarburos no metanos (HCNM)		Masa de óxidos de nitrógeno (NOx)		Masa combinada total de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno totales (HCT + NOx)		Masa de partículas (MP)	
			L ₁ (mg/km)		L ₂ (mg/km)		L ₃ (mg/km)		L ₄ (mg/km)		L ₂ + L ₄ (mg/km)		L ₄ (mg/km)	
			PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI ⁽¹⁾	CI
M	—	Todos	1000	500	100	—	68	—	60	180	—	230	5,0	5,0
N ₁	I	MR ≤ 1305	1000	500	100	—	68	—	60	180	—	230	5,0	5,0
	II	1305 < MR ≤ 1760	1810	630	130	—	90	—	75	235	—	295	5,0	5,0
	III	1760 < MR	2270	740	160	—	108	—	82	280	—	350	5,0	5,0
N ₂			2270	740	160	—	108	—	82	280	—	350	5,0	5,0

Clave: PI = encendido por chispa, CI = encendido por compresión

⁽¹⁾ Se establecerá una norma relativa al número lo antes posible y, a más tardar, tras la entrada en vigor de Euro 6.

⁽²⁾ Las normas sobre normas de masa de partículas de los vehículos de encendido por chispa se aplican únicamente a los vehículos con motores de inyección directa.

Tabla 9. Valores límite de la norma EURO 6 para motores MEP (PI) y MEC (CI) [BASMA]

3.9 Aspectos económicos

En el presente apartado se desarrollará una síntesis de los aspectos relevantes en materia económica comparando el empleo de gasolina y de gas natural comprimido.

COSTE DEL COMBUSTIBLE

El precio es uno de los principales puntos diferenciadores entre el gas natural vehicular y la gasolina.

Uno de los factores de mayor influencia en el precio de ambos combustibles es el impuesto de hidrocarburos, un impuesto especial que grava el uso de combustibles hidrocarburos y que es mucho más benévolo por parte de las administraciones con el gas natural que con los combustibles tradicionales.

Para el gas natural, este impuesto tiene un valor de 1,15 €/GJ, que supone aproximadamente un gravamen de 0.05 €/kg de combustible.

En el caso de la gasolina, el impuesto especial de hidrocarburos varía entre 0.40 €/L para la gasolina sin plomo 95 y 0.43 €/L para la gasolina sin plomo 98, lo que expresado en términos de valor por unidad de masa son 0.55-0.59 €/kg.

Se aprecia una diferencia cuantiosa, que sitúa al gas natural comprimido como un combustible económicamente más competitivo que la gasolina. Mientras el precio de la gasolina sin plomo 95 oscila habitualmente en torno a los 1.15 €/L (1.58 €/kg), el precio del gas natural vehicular se sitúa en 0.864 €/kg [Datos en España en junio de 2016].

APOYO DE LAS ADMINISTRACIONES PÚBLICAS

La gran oportunidad que supone el gas natural para uso en automóviles por ser una energía mucho más limpia que los combustibles fósiles tradicionales (gasolina y gasóleo) lleva a las administraciones públicas a la creación de numerosos planes de ayuda a las inversiones en este combustible.

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) contempla números medidas para el sector del transporte en referencia a la renovación del parque de vehículos, con ayudas económicas para los usuarios y compañías de estaciones de carga.

Es el caso del Plan MOVEA (Plan de Impulso a la Movilidad con Vehículos de Energías Alternativas), que tiene por objetivo incentivar la compra de vehículos con combustibles alternativos, destinando un presupuesto para tal fin de dos millones de euros (Real Decreto 1078/2015).

La compra de turismos que empleen gas natural tendrá una subvención de 3000€ por parte del gobierno, además de 1000€ por parte del concesionario. En el caso de furgonetas y camiones ligeros, la ayuda podrá oscilar entre los 3500€ y los 6500€, y para autobuses y camiones entre 11000€ y 21000€. Es destacable además, que algunas administraciones autonómicas disponen de ayudas adicionales, complementarias a las anteriores.

Otro punto a destacar es la reducción del 20% sobre el IRPF de la que se ven beneficiados los vehículos de uso profesional energéticamente eficientes, que puedan usar combustibles alternativos como el gas natural y cumplan con los límites de emisiones EURO 6.

Si a todo ello se suma la exención de impuesto de matriculación para vehículos con emisiones inferiores a los 120 g CO₂/km, algo que cualquier vehículo ligero impulsado por gas natural consigue con facilidad, se encuentra otro punto importante a favor de este combustible.

Emisiones de CO ₂ (g CO ₂ /km)	% sobre el precio del vehículo
< 120	Exento
120 - 160	4,75
160 - 200	9,75
> 200	14,75

Tabla 10. Impuesto de matriculación según emisiones de CO₂

ESTUDIO ECONÓMICO SOBRE LA RENTABILIDAD DE USO DE GN.

Inversión inicial y amortización

Aunque Renault no posee ningún vehículo que emplee gas natural para establecer una comparación de precio entre los modelos de gas natural y gasolina, vehículos ligeros similares de otras marcas permite conocer el sobrecoste que conlleva elegir un modelo impulsado por gas natural.

En el caso del Seat León 1.4 TGI 110 CV, que aunque se trata de un modelo bi-fuel, puede servir para establecer una comparativa, el incremento respecto al modelo 1.2 TSI con idéntica potencia es de aproximadamente 2.500 €.

Aunque las ayudas gubernamentales y autonómicas pueden reducir aún más la diferencia hasta asemejar ambos precios, para la hipótesis de la rentabilidad de la inversión se tomarán los precios iniciales.

Mantenimiento

El plazo para la mayoría de las revisiones periódicas (cambio del aceite del motor, del filtro de aire de admisión...) de un vehículo impulsado por gas natural comprimido puede considerarse igual que para uno de gasolina.

Sin embargo, la regulación europea ECE, en su reglamento R110, marca una **revisión del tanque** y de las conducciones de gas cada cuatro años, para asegurar que no existan fugas y que las válvulas de seguridad funcionen adecuadamente.

Los depósitos de almacenamiento de GNC son un punto clave en el mantenimiento del vehículo. Al estar sometidos a una presión alta (200 bares) y a los cambios de presión y temperatura asociados a los procesos de carga y descarga, sufren fatiga, otorgándose una fecha límite para su vida útil.

En Europa, la regulación ECE R110 especifica que los tanques de acumulación de GNC en automóviles tendrán una vida útil máxima de 20 años desde su entrada en servicio.

La revisión y sustitución de los tanques de almacenamiento del gas natural comprimido es el único punto claramente diferenciador entre el coste del mantenimiento del vehículo para las configuraciones de gasolina y de gas natural. Sin embargo, a excepción de las revisiones cada cuatro años, la sustitución solo se tendrá que efectuar, en condiciones normales, cada 20 años, periodo que supera ampliamente la vida media de un vehículo en España.

Por tanto, aunque el balance en este aspecto pueda considerarse ligeramente desfavorable para el gas natural comprimido, no se trata de un factor claramente diferenciador en la elección de una u otra alternativa por fines meramente económicos.

Valoración global

Para establecer una comparativa que permita definir qué modelo resulta económicamente más rentable, se parte del precio medio del Renault Captur TCE 90 CV y de un precio ficticio del mismo vehículo con una alternativa de gas natural.

También se supondrá el valor residual del vehículo tras un periodo determinado desde su adquisición, 4 años, para comprobar el valor de amortización de ambos modelos.

	Inversión inicial	Valor residual (tras 4 años)	Amortización (tras 4 años)
Gasolina	18.500 €	5.000 €	13.500 €
Gas Natural Comprimido	21.000 €	6.000 €	15.000 €

Tabla 11. Datos de inversión y amortización para un vehículo en sus modelos de gasolina y GNC

Para los cálculos del coste del combustible en ese periodo, se toma una distancia recorrida de 20.000 km/año. Total: 80.000 km.

Empleando los consumos a los 100 km para gasolina y para gas natural (calculados en el capítulo 4) y los precios anteriormente referenciados, se hallará el coste económico por kilómetro para cada uno de los combustibles:

Gasolina:

$$5.4 \text{ L}/100 \text{ km} \cdot 80000 \text{ km} = 4320 \text{ L totales consumidos}$$

$$4320 \text{ L} \cdot 1.15 \text{ €/L} = 4968 \text{ € totales}$$

$$4968 \text{ €} / 80.000 \text{ km} = 0.0621 \text{ €/km}$$

GNC:

$$3.66 \text{ kg}/100 \text{ km} \cdot 80000 \text{ km} = 2928 \text{ kg}$$

$$2928 \text{ kg} \cdot 0.864 \text{ €/kg} = 2530 \text{ € totales}$$

$$2530 \text{ €} / 80000 \text{ km} = 0.0316 \text{ €/km}$$

En la siguiente tabla se establece una comparativa entre ambos combustibles en base a los factores económicos estudiados:

	Combustible (€/km)	Amortización (€/km)	Mantenimiento (€/km)
Gasolina	0.0621	0,175	Similar
Gas Natural Vehicular	0.0316	0.1875	Similar
Valoración del GNC	Positivo	Negativa	Similar

Tabla 12. Comparativa de la amortización, coste de combustible y coste de mantenimiento para los modelos de gasolina y GNC

Considerándose similar el coste de mantenimiento, los factores del coste de combustible y la amortización son los principales diferenciadores.

En cuanto al coste del combustible, existe una diferencia por kilómetro:

$$\text{Coste GASOLINA} - \text{Coste GN} = 0.0621 \text{ €/km} - 0.0316 \text{ €/km} = 0.0305 \text{ €/km}$$

Esto permite calcular los kilómetros recorridos a partir de los cuales se amortiza la mayor inversión necesaria para adquirir el vehículo en su versión de gas natural (2.500 €):

$$\text{Kilometraje para rentabilizar la inversión: } 2500 \text{ €} / 0.0305 \text{ €/km} = 81967,2 \text{ km}$$

En términos globales, se puede concluir que para una inversión de 2.500 € superior, y al precio que se ha estimado para ambos combustibles, el usuario comienza a beneficiarse del ahorro en el desplazamiento a partir de los 82.000 km recorridos, cifra que puede alcanzarse en una media de 4 años.

4 CÁLCULO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL

El objeto de este capítulo es detallar los cálculos que han permitido llevar a cabo el dimensionado del sistema de almacenamiento necesario para el nuevo combustible.

Se ha partido de un vehículo de gasolina cuyas características técnicas son conocidas, el modelo Renault Captur TCe 90 CV.

Renault Captur TCe 90 CV

Características técnicas:

- Consumos de gasolina a los 100 km (consumos de homologación facilitados oficialmente por Renault)
 - Urbano: 6,3 l/100 km
 - Interurbano: 4,6 l/100 km
 - Mixto: 5,4 l/100 km (Se empleará este dato para todos los cálculos).
- Capacidad del depósito de combustible (gasolina): 45 l
- Masa vehículo en orden de marcha: 1245 kg
- Potencia max: 66 kW
- Emisiones de CO₂ por kilómetro recorrido: 120 g CO₂ / km
- Norma a la que se encuentran sometidas las emisiones contaminantes: EURO 5

Se comprueba en primer lugar la coherencia entre el consumo de combustible (la densidad y composición del combustible serán datos desconocidos) y la emisión de CO₂.

$$\text{Emisiones CO}_2: \frac{m \text{ CO}_2}{L} = 120 \text{ g CO}_2/\text{km}$$

$$\text{Consumo en 100 km: } \frac{V(L)}{100\text{km}} = 5.4 \text{ L}/100\text{km}$$

Si tomamos una composición de gasolina estándar, basada en una relación de hidrocarburos C₈H₁₈ (octano), las emisiones de CO₂ por masa de combustible consumido serán:

$$e \text{ CO}_2 \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g gasolina}} \right) = \frac{44}{12 + \frac{m}{n} + 16 \frac{p}{n}} = 3.087 \frac{\text{g CO}_2}{\text{g gasolina}}$$

Relacionando las emisiones de CO₂ y el factor hallado, se obtienen los gramos de gasolina consumidos por kilómetro:

$$\frac{\frac{m \text{ CO}_2}{L}}{e \text{ CO}_2} = \frac{120 \text{ g } \frac{\text{CO}_2}{\text{km}}}{3.087 \frac{\text{g CO}_2}{\text{g gasolina}}} = 38.87 \frac{\text{g gasolina}}{\text{km}}$$

Para establecer la relación con el consumo en L a los 100 km recorridos, únicamente resta introducir la densidad de la gasolina.

$$38.87 \frac{\text{g gasolina}}{\text{km}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{gasolina}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}} \right)} \cdot \frac{100 \text{ km}}{100 \text{ km}} = 5.4 \text{ L}/100\text{km}$$

Para que se cumpla tal relación, el valor de la densidad de la gasolina ha de ser:

$$\rho_{\text{gasolina}} = 0.72 \text{ kg/L (valor estándar empleado por las gasolinas tradicionales).}$$

A partir de estos parámetros se realizará un cálculo de las propiedades que tendrá el gas natural comprimido en las condiciones de almacenamiento, la autonomía deseada para el vehículo adaptado y, en consecuencia, el volumen de almacenamiento y las características de los depósitos a emplear.

4.1 Autonomía

En este apartado se calcula la autonomía inicial del vehículo alimentado por gasolina, para conocer las prestaciones que tiene que otorgar en ese aspecto el vehículo adaptado, lo que permite dimensionar el espacio de almacenamiento necesario para el nuevo combustible.

AUTONOMÍA Y CONSUMOS PARA LA CONFIGURACIÓN INICIAL: GASOLINA

Se calcula en primer lugar la autonomía del vehículo original, la cual se pretende que mantenga, en primera aproximación, con la configuración para el nuevo combustible, GNC:

$$\text{Autonomía} = \frac{\text{Combustible almacenado (L)}}{\text{Consumo en 100km (L/100km)}} = \frac{45 \text{ L}}{5.4 \text{ L/100km}} = 833.33 \text{ km}$$

Partiendo de los datos de la gasolina, se halla la energía producida por litro de gasolina:

H_c gasolina	43 MJ/kg
ρ gasolina	0.73 kg/L

$$\frac{E_{\text{producida}}(\text{kWh})}{V_{\text{gasolina}}(\text{L})} = H_{c_{\text{gasolina}}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) \cdot \rho_{\text{gasolina}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}} \right) \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3.6 \text{ MJ}} = 8.72 \frac{\text{kWh}}{\text{L}}$$

Por tanto, conocidos el consumo de gasolina en litros a los 100 km y la energía generada por litro de gasolina, se puede obtener la energía que debe suministrar dicho combustible para recorrer 1 km:

$$\frac{E_f(\text{kWh})}{\text{km recor.}} = \frac{E_{\text{prod.}}(\text{kWh})}{V_{\text{gasolina}}(\text{L})} \cdot \frac{\text{Consumo}(\text{L})}{100 \text{ km}} = 8.72 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 5.4 \frac{\text{L}}{100\text{km}} = 0.47 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} = 470 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$$

Con la energía a suministrar por el combustible por kilómetro recorrido y la autonomía, se puede calcular finalmente la energía total que debe almacenarse en forma de combustible en el depósito.

$$E_{\text{almacen.}}(\text{kWh}) = \frac{E_f(\text{kWh})}{\text{km recor.}} \cdot \text{Autonomía}(\text{km}) = 0.47 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \cdot 833.3 \text{ km} = 391.65 \text{ kWh}$$

Se puede establecer también el valor conjunto del rendimiento del motor y de la transmisión para el vehículo inicial. Para ello, se tomará el dato de consumo de energía en rueda obtenido en el New European Driving Cycle para el vehículo de referencia. Partiendo de los siguientes datos:

Dimensiones: Alto: 1.573 m

Ancho: 1.770 m

Masa en vacío del vehículo: 1176 kg

(Se añade 75 kg de masa de piloto + 15 kg de masa de combustible)

El consumo de energía por unidad de longitud obtenido en el cálculo (ver documento adjunto "Cálculo NEDC") es el siguiente:

$$\frac{E_{\text{ruedas}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}} = 45235 \frac{\text{kJ}}{100\text{km}} = 125.65 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$$

A partir de ambos valores de consumo de energía en el depósito y de energía requerida en las ruedas, se puede deducir el valor global del rendimiento del motor y la transmisión:

$$\frac{E_{\text{ruedas}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}} = \frac{E_{\text{combust.}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{trans}}$$

$$\eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{trans}} = \frac{\frac{E_{\text{ruedas}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}}}{\frac{E_{\text{combust.}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}}} = \frac{125.65 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}}{470 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}} = 0.267$$

CONSUMOS Y MASA DE COMBUSTIBLE REQUERIDO: GNC

Para establecer una equivalencia con la energía a suministrar por el gas natural comprimido, es necesario conocer los nuevos rendimientos de motor y transmisión para la configuración GNC. Puesto que no es objeto del presente TFM analizar el nuevo rendimiento del motor, se supondrá que el producto de los rendimientos del motor y la transmisión para la nueva configuración, es igual al original del vehículo alimentado con gasolina.

$$\text{Vehículo GNC: } \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{trans}} = 0.267$$

Se supondrá también que, el vehículo en ambas configuraciones, requiere la misma cantidad de energía en las ruedas por kilómetro. Por tanto, también será igual la energía a suministrar por el combustible por kilómetro.

Se establece por tanto, que en una primera aproximación y supuestos iguales para ambas configuraciones del vehículo los rendimientos de motor y transmisión y la energía requerida en las ruedas, la energía que es necesario almacenar para otorgar la autonomía inicial, será la misma.

Una vez conocida la masa del conjunto combustible más depósito, se valorará considerar si el aumento de la masa del vehículo puede influir sobre la fuerza de rodadura y sobre la variación de energía cinética de los cambios de velocidad y, por tanto, elevar el consumo de energía necesario en las ruedas.

Propiedades del gas natural

Conocida la energía que es necesario almacenar, basta con hallar la energía que suministra el combustible por unidad de masa para obtener la cantidad de combustible necesaria. El poder calorífico del gas natural empleado se muestra en la Tabla 5.

$$E_{\text{producida por kg de GNC}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) = \frac{46.225 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{3.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}}} = 12.84 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Masa a almacenar:

$$m_{\text{GNC necesaria}} = \frac{E_{\text{almacen.}}(\text{kWh})}{E_{\text{producida por kg de GNC}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right)} = \frac{391.65 \text{ kWh}}{12.84 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 30.5 \text{ kg}$$

Este valor se puede comparar con la masa de gasolina necesaria para producir esa energía:

$$m_{\text{gasolina necesaria}} = 45 \text{ L} \cdot 0.73 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 32.85 \text{ kg}$$

El consumo de combustible por longitud recorrida vale:

$$\text{Consumo } \frac{\text{kg}}{\text{km}} = \frac{470 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}}{12840 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} = 0.0366 \frac{\text{kg}}{\text{km}} = 3.66 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$$

La masa de GNC necesaria es ligeramente inferior a causa del mayor poder calorífico, sin embargo, todavía resta calcular el volumen ocupado y en posteriores apartados, la masa del depósito contenedor, que no es despreciable como en el caso del depósito de gasolina.

Para calcular el volumen que ocupa el GNC en el depósito, se emplea la ley de los gases ideales.

$$P \cdot V = n \cdot R_{\text{GN}} \cdot T$$

Siendo:

P: Presión absoluta en pascuales (Pa). Presión de almacenaje = 200 bar

V: volumen ocupado en m³

n: cantidad de materia en moles (mol)

R_{GN} : constante del gas natural: $R_{GN} = \frac{R_U}{M_{GN}}$

T: Temperatura en kelvin (K). Temperatura de almacenaje = $T_{AMBIENTE} = 15^\circ C = 288 K$

Para adaptarla a una situación más real, se incluirá el **factor de compresibilidad Z** para el gas natural. Este factor considera la falta de idealidad del gas.

$$P \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \rightarrow \frac{P}{\rho} = Z \cdot R \cdot T$$

El cálculo del factor Z conlleva utilizar las propiedades críticas del gas en cuestión. Puesto que el gas natural está compuesto por diversas sustancias (fundamentalmente metano, etano, nitrógeno y dióxido de carbono) se hará uso de las **propiedades pseudocríticas de la mezcla**.

En la siguiente tabla se presentan las temperaturas y presiones críticas de los componentes que conforman el gas natural, tomándose un porcentaje de composición molar promedio. La tabla permite calcular la temperatura y presión pseudocrítica del gas natural.

Compuesto	T_c (K)	P_c (kPa)	M (g/mol)	% molar GN	X_i molar GN	$X_i \cdot T_c$ (K)	$X_i \cdot P_c$ (kPa)	$X_i \cdot M$ (g/mol)
Nitrógeno	126,2	3394,39	28,0	1,094	0,01094	1,38	37,13	0,306
Diox. Carbono	304,2	7376,46	44,0	2,027	0,02027	6,17	149,52	0,892
Metano	190,6	4600,16	16,0	85,782	0,85782	163,50	3946,10	13,725
Etano	305,4	4883,87	30,0	9,387	0,09387	28,67	458,45	2,816
Propano	369,8	4245,52	44,0	1,420	0,01420	5,25	60,29	0,625
i-Butano	408,1	3647,70	58,0	0,114	0,00114	0,47	4,16	0,066
n-Butano	425,2	3799,69	58,0	0,134	0,00134	0,57	5,09	0,078
i-Pentano	460,4	3384,26	72,0	0,023	0,00023	0,11	0,78	0,017
n-Pentano	469,6	3374,12	72,0	0,016	0,00016	0,08	0,54	0,012
n-Hexano	507,4	2968,82	86,0	0,003	0,00003	0,02	0,09	0,003
				100	1	206,20	4662,15	18,539

Tabla 13. Cálculo de las propiedades pseudocríticas del gas natural

Temperatura pseudocrítica GN: $T_{PC} = 206,2 K$

Presión pseudocrítica GN: $P_{PC} = 4.662.152 Pa = 4.662 MPa$

Se calculan a continuación las **propiedades pseudoreducidas** de acuerdo a las propiedades del gas almacenado, según el método de Standing-Katz (Diagrama 3). Las condiciones que recoge el Reglamento regulador europeo ECE R110 para el almacenamiento de gas natural comprimido son una presión máxima estabilizada de 200 bar y una temperatura de 15°:

$$T \text{ almacenaje} = 15^\circ C = 288 K \quad T_{PSEUDORREDUCIDA} = \frac{288 K}{206.2 K} = 1.40$$

$$P \text{ almacenaje} = 200 \text{ bar} \quad P_{PSEUDORREDUCIDA} = \frac{200 \text{ bar}}{46.62 \text{ bar}} = 4.29$$

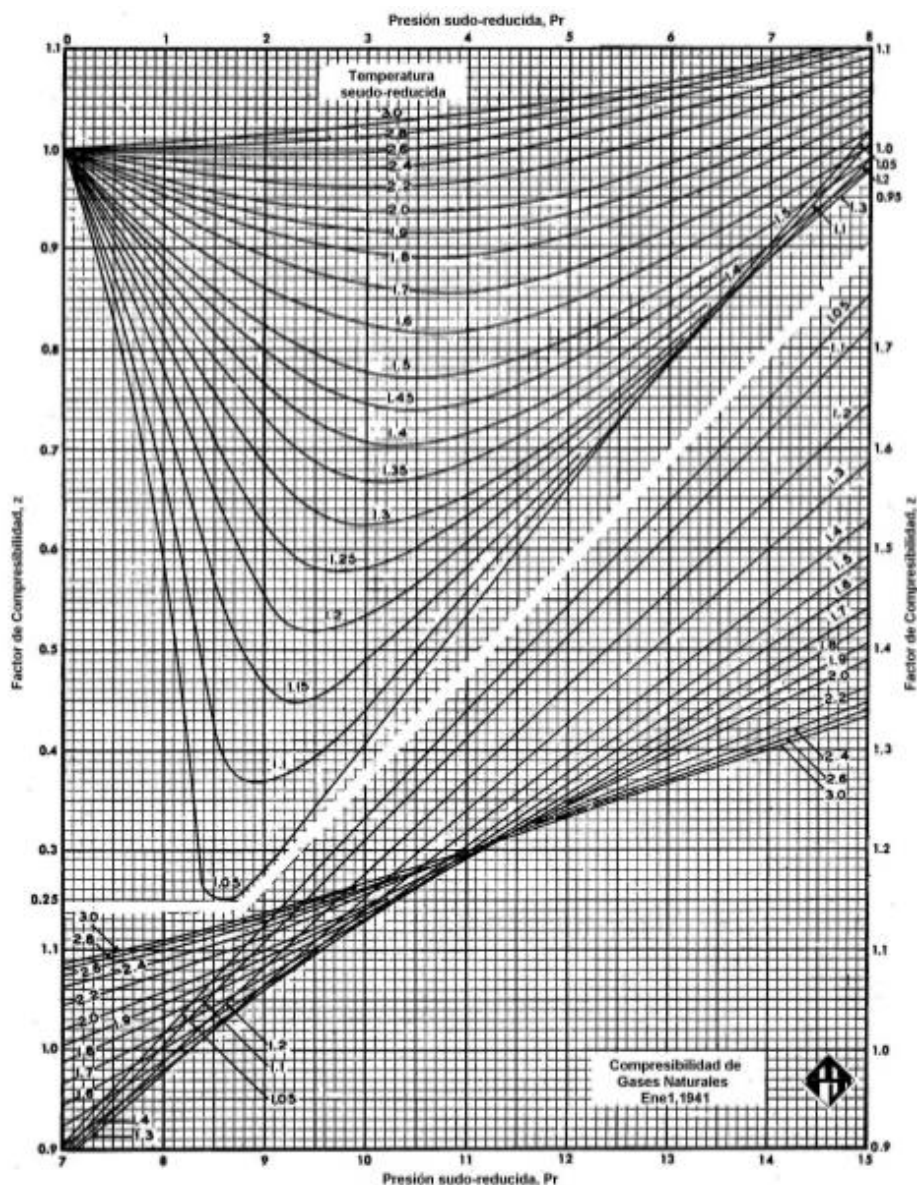


Diagrama 3. Factor de compresibilidad de gases naturales en función de presión y temperatura pseudoreducidas [Standing-Katz, 1942]

El factor de compresibilidad Z obtenido es: $Z = 0.73$

Como comparación, en el Gráfico 17 se aprecia la evolución del factor de compresibilidad con la presión para el **metano puro**, situándose el mínimo aproximadamente en los 175 bar. **Para la composición de gas natural considerada**, el valor del factor es inferior al del metano mostrado en el gráfico. También se puede ver que el factor de compresibilidad para el hidrógeno es siempre mayor que la unidad.

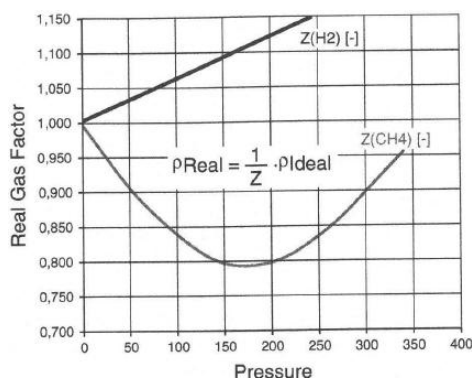


Gráfico 17. Evolución del factor de compresibilidad con la presión para CH₄ y H₂ [Basshuysen, 2016]

Obtenido el factor de compresibilidad para el gas natural, solo resta hallar el valor de la constante de los gases R_{GN} para poder obtener la densidad del gas natural en las condiciones de almacenaje:

$$R_{GN} = \frac{R_U}{M_{GN}} = \frac{8.3145 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}}{0.01854 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 448.463 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

La densidad se puede obtener a partir de la expresión:

$$\frac{P}{\rho} = Z \cdot R \cdot T$$

$$\rho = \frac{P}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{200 \cdot 10^5 \text{ (Pa)}}{0.73 \cdot 448.463 \cdot 288} = 212.12 \text{ kg/m}^3$$

Si se produjera un aumento de T , hasta los 45°C , la presión que soportaría el depósito sería:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T_1 \\ P_2 \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T_2 \end{array} \right\} \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{200 \cdot 318}{288} = 220.83 \text{ bar}$$

Esta presión, aunque excediendo la contemplada en el reglamento para el diseño, estaría dentro del rango de seguridad de los depósitos si cumplen con la homologación pertinente.

Obtenida la densidad de almacenamiento del GNC únicamente resta calcular el volumen que ocupará la masa de GNC necesario para proporcionar la autonomía del vehículo de referencia.

El volumen que ocupará el combustible gaseoso a 200 bar y 15°C será:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{30.5 \text{ kg}}{212.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,1437 \text{ m}^3 = 143.7 \text{ L}$$

Se trata de un volumen tres veces mayor al necesario para el almacenamiento de la gasolina.

4.2 Almacenamiento de gas natural comprimido

En este apartado se llevarán a cabo los cálculos para dimensionar los depósitos de almacenamiento del gas natural comprimido, así como su número y disposición más idónea para minimizar su influencia en la masa total del vehículo y el espacio útil.

Como se ha indicado en el anterior apartado, las condiciones que recoge el reglamento regulador europeo ECE R110 para el almacenamiento de gas natural comprimido son una presión máxima estabilizada de 200 bar y una temperatura de 15° .

De entre los materiales recogidos por la normativa para las botellas de almacenamiento, se realizará un análisis de la masa y volumen de los depósitos para las opciones de acero y aluminio.

Las dimensiones de las botellas se verán supeditadas a las dimensiones disponibles en el vehículo. Los espacios idóneos para albergarlas son la zona bajo piso donde se dispone el depósito de gasolina en el vehículo con su configuración inicial y el doble fondo del maletero con el que cuenta el Renault Captur. La disposición de los tanques bajo el piso conlleva una mayor necesidad de volumen que en la opción de gasolina, por lo que algunos elementos pueden ser susceptibles de tener que modificar su ubicación. Aunque no es el caso de los conductos de escape, que ya discurren por un lateral del volumen bajo el piso, pueden existir ciertos dispositivos que requiriesen un estudio para su disposición.

Puesto que la máxima longitud disponible entre los pasos de rueda es de un metro, con los depósitos dispuestos transversalmente a la dirección principal del vehículo, la longitud máxima de estos no podrá exceder de 0.95 m, tanto en la zona bajo el piso como en la zona adaptada del maletero. Hay

que tener en cuenta que será necesario disponer de 0.05 adicionalmente para las válvulas de los depósitos (1 m de longitud disponible).

El diámetro exterior máximo en la zona bajo el piso no podrá excederá 0.193 m, mientras que en la zona del maletero, si no se quiere tener que modificar las sujeciones de la tapa del doble fondo y el guarnecido, el diámetro exterior no superará los 0.18 m.

El espacio longitudinal disponible para albergar cilindros es de 0.526 m en la zona bajo piso y de 0.577 m en el falso fondo del maletero.

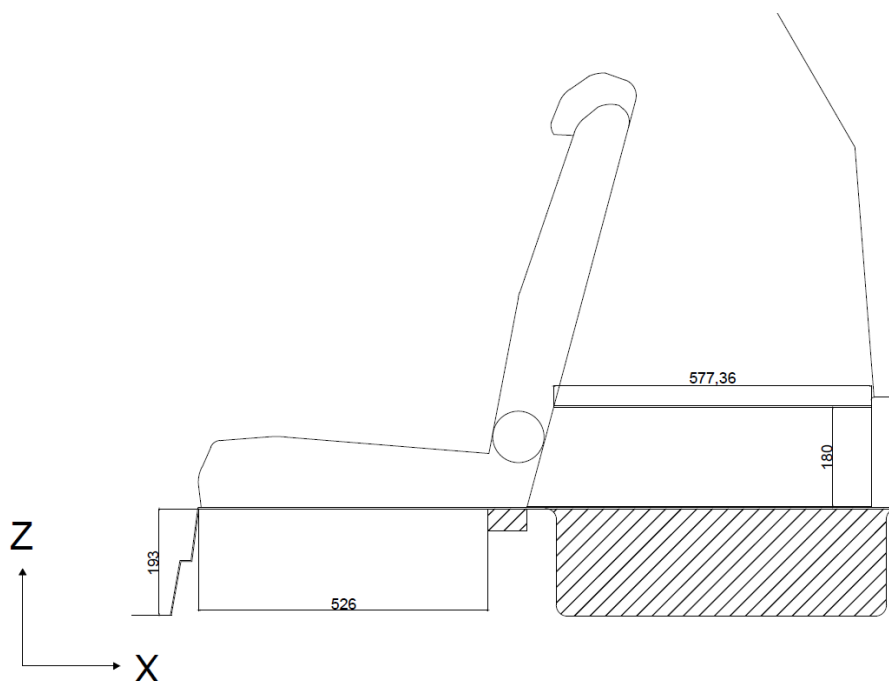


Ilustración 22. Vista principal del vehículo cortado transversalmente, donde se aprecian los espacios bajo el piso y en el doble fondo del maletero

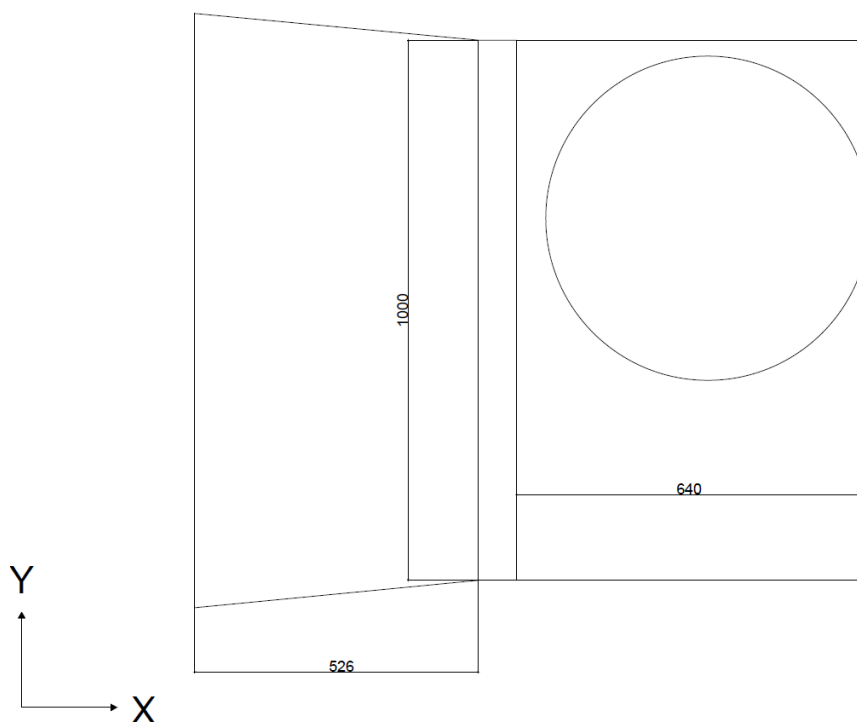


Ilustración 23. Planta principal del vehículo donde se aprecian los espacios bajo el piso y en el doble fondo del maletero

4.2.1 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS DEPÓSITOS

Con estas limitaciones, se calculan a continuación las dimensiones y el número de depósitos óptimos en base al espesor de las paredes y el diámetro, que repercutirán directamente en la masa.

Como simplificación para evitar establecer radios de acuerdo, **los extremos de los depósitos se considerarán semiesferas** a efectos de todos los cálculos. Aunque esto repercute negativamente en el volumen disponible para almacenar el combustible si se considerase un radio de acuerdo mayor en los extremos del cilindro, se trata de una cantidad despreciable en relación al volumen total.

Se definen los parámetros a utilizar:

e_{pared} : Espesor de la pared de cilindro y zona esférica.

D_{int} : Diámetro interior de cilindro y zona esférica.

D_{ext} : Diámetro exterior de cilindro y zona esférica. $D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} + 2 \cdot e_{\text{pared}}$

D_m : Diámetro medio de cilindro y zona esférica. $D_m = \frac{D_{\text{int}} + D_{\text{ext}}}{2} = D_{\text{int}} + e_{\text{pared}}$

L : Longitud de la parte cilíndrica del depósito.

L_{max} : Longitud máxima del depósito. $L_{\text{max}} = L + D_{\text{ext}}$

D_{max} : Diámetro máximo del depósito. $D_{\text{max}} = D_{\text{ext}}$

P_{int} : Presión interna del depósito.

σ : Tensión última del material.

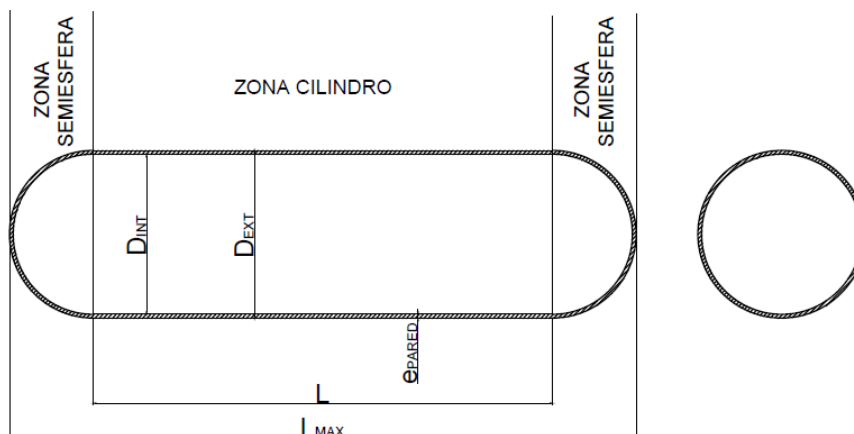


Ilustración 24. Dimensiones de los depósitos de almacenamiento

ZONA CILÍNDRICA

Para el cálculo del espesor de la zona cilíndrica se hará uso del planteamiento descrito por la "ecuación de Barlow". La presión interior del gas almacenado se aplica uniformemente sobre las paredes interiores del cilindro. El razonamiento seguido consiste en tomar la mitad del cilindro, cortado longitudinalmente, de manera que las componentes verticales de la presión se anulen por simetría. De este modo, el efecto de la presión puede considerarse horizontal y perpendicular sobre el diámetro del cilindro. El efecto que se opondría a esta presión es el producto de la resistencia del material del depósito y el espesor, en las dos zonas afectadas:

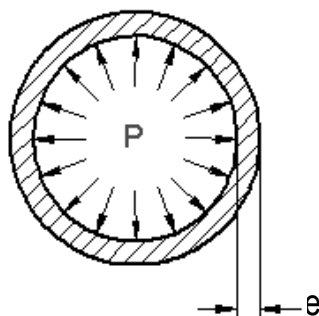


Ilustración 25. Distribución de la presión en el interior del cilindro

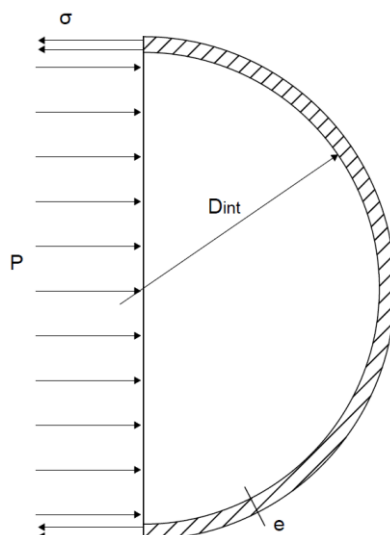


Ilustración 26. Cilindro cortado a la mitad. La componente vertical de la presión se anula por simetría, quedando la resultante aplicada perpendicularmente al diámetro interior del depósito

De este modo, el efecto de la presión sobre el diámetro interior del cilindro, y aplicado en toda su longitud, se iguala al esfuerzo que realiza el material de la pared a través de su espesor y mediante la tensión resistente, a lo largo de toda la longitud:

$$D_{int} \cdot L \cdot P_{int} = 2 \cdot e_{pared} \cdot L \cdot \sigma \rightarrow e_{pared} = \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma}$$

El espesor de la pared del depósito es, por tanto, dependiente del diámetro interno, la presión y la tensión de rotura del material. Sin embargo, como puede verse, a igualdad de los otros factores, la relación entre el espesor de la pared y el diámetro interior se mantiene constante.

ZONA ESFÉRICA

Para el caso de los extremos semiesféricos de los depósitos, puede seguirse un planteamiento similar al de la parte cilíndrica. Tomando únicamente la semiesfera, la presión se aplica uniformemente sobre las paredes interiores. Al tener una sola mitad, la componente vertical se anula por simetría, pudiendo considerarse la presión aplicada horizontal y perpendicularmente sobre la superficie del círculo creado por el diámetro interior. En este caso, la fuerza que se opone a la presión es la tensión del material y la superficie de corona circular representada por el espesor.

Esta superficie será:

$$\begin{aligned} S_{pared} &= \frac{\pi \cdot D_{ext}^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (D_{int} + 2e)^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} \\ &= \frac{\pi}{4} (4e \cdot D_{int} + 4e^2) = \pi \cdot e \cdot (D_{int} + e) = \pi \cdot e \cdot D_{medio} \end{aligned}$$

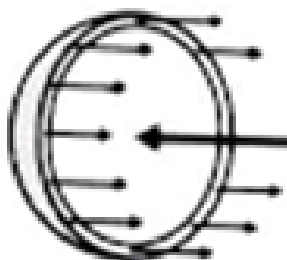


Ilustración 27. Distribución de la presión en la semiesfera y reacción del material

El espesor resultante en la zona semiesférica será:

$$\frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} \cdot P_{int} = e_{pared} \cdot \pi \cdot D_m \cdot \sigma \rightarrow e_{pared} = \frac{D_{int}^2 \cdot P_{int}}{4 \cdot D_m \cdot \sigma}$$

ESPESOR UNIFICADO

Puesto que ambas expresiones conducen a distintos espesores en la zona cilíndrica (mayor) y en la zona semi-esférica (menor, aproximadamente la mitad) de los depósitos, la solución constructiva más idónea consiste en unificar en todo el depósito el espesor de la zona más solicitada, que es la cilíndrica. De otro modo, habría que recurrir a un cambio de espesores o un cambio de material que dificultaría seriamente la unión por soldadura de ambas zonas.

$$e_{\text{pared}} = \frac{D_{\text{int}} \cdot P_{\text{int}}}{2 \cdot \sigma}$$

4.2.2 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES Y LA MASA DEL DEPÓSITO

Conocidas las expresiones que relacionan el espesor de la pared con el diámetro del depósito, se está en disposición de formular una expresión que permita dimensionar ambas variables en función del volumen a almacenar. Éste dependerá del número de depósitos a emplear.

Se determinará el D_{int} partiendo del volumen a almacenar, función de la masa de combustible necesaria y de la densidad del gas en las condiciones de almacenamiento (ambas calculadas anteriormente).

$$V_{\text{int.}} = V_{\text{int.cilindro}} + 2 \cdot V_{\text{int.semiesfera}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{int}}^2}{4} \cdot L + \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D_{\text{int}}}{2}\right)^3 = D_{\text{int}}^2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot L + \frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{int}}\right)$$

Aparece una nueva incógnita, L , que dependerá directamente del diámetro, ya que está condicionada por la máxima longitud disponible y el diámetro de las zonas semiesféricas:

$$\begin{aligned} L = L_{\text{max}} - D_{\text{ext}} &= L_{\text{max}} - (D_{\text{int}} + 2e_{\text{pared}}) = L_{\text{max}} - \left(D_{\text{int}} + \frac{D_{\text{int}} \cdot P_{\text{int}}}{\sigma_{\text{material}}}\right) \\ &= L_{\text{max}} - D_{\text{int}} \left(1 + \frac{P_{\text{int}}}{\sigma_{\text{material}}}\right) \end{aligned}$$

Por comodidad en futuros cálculos, se denomina como λ al último factor:

$$\lambda = 1 + \frac{P_{\text{int}}}{\sigma_{\text{material}}}$$

Finalmente, la longitud de la zona cilíndrica tendrá la siguiente expresión:

$$L = L_{\text{max}} - D_{\text{int}} \cdot \lambda$$

Sustituyendo L en la ecuación del volumen interior:

$$\begin{aligned} V_{\text{int.}} &= D_{\text{int}}^2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot (L_{\text{max}} - D_{\text{int}} \cdot \lambda) + \frac{\pi}{6} \cdot D_{\text{int}}\right) = D_{\text{int}}^2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot (L_{\text{max}} - D_{\text{int}} \cdot \lambda + \frac{2}{3} \cdot D_{\text{int}})\right) \\ &= D_{\text{int}}^2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot \left(L_{\text{max}} + \left(\frac{2}{3} - \lambda\right) \cdot D_{\text{int}}\right)\right) \end{aligned}$$

Ya se está en disposición de despejar D_{int} en función de parámetros conocidos, resultando:

$$D_{\text{int}} = \sqrt{\frac{V_{\text{int.}}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(L_{\text{max}} + \left(\frac{2}{3} - \lambda\right) \cdot D_{\text{int}}\right)}}$$

El cálculo requiere de diversas iteraciones hasta conseguir igualar el D_{int} a ambos lados de la ecuación, por lo que se realiza mediante una hoja de cálculo que acompaña a la presente memoria. Se inicia con el D_{int} mínimo (0) y se observa como a medida que se va sustituyendo por el valor calculado, la ecuación va convergiendo hacia el resultado final. Se calcularán las condiciones para un determinado número de depósitos (de 1 a 8) considerando en todo momento que todos ellos almacenan la misma cantidad de gas.

A continuación, y una vez conocido el D_{int} del depósito, se planteará la ecuación que permita calcular el volumen del material de la pared, y por tanto, la masa del depósito:

$$\begin{aligned} m_{\text{depósito}} &= \rho_{\text{material}} \cdot V_{\text{material}} = \rho_{\text{material}} \cdot (V_{\text{pared cilindro}} + 2 \cdot V_{\text{pared semiesfera}}) \\ &= \rho_{\text{material}} \cdot \left[\pi(D_{int} + e_{\text{pared}}) \cdot e_{\text{pared}} \cdot L + \frac{4\pi}{3} \left(\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^3 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^3 \right) \right] \\ &= \rho_{\text{material}} \cdot \left[\pi(D_{int} + e_{\text{pared}}) \cdot e_{\text{pared}} \cdot L + \frac{\pi}{6} ((D_{int} + 2e_{\text{pared}})^3 - D_{int}^3) \right] \\ &= \rho_{\text{mat}} \cdot \left[\pi \left(D_{int} + \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma} \right) \cdot \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma} \cdot L + \frac{\pi}{6} \left((D_{int} + 2 \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma})^3 - D_{int}^3 \right) \right] \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que:

$$L = L_{\text{max}} - D_{ext} = L_{\text{max}} - D_{int} - 2 \cdot e_{\text{pared}} = L_{\text{max}} - D_{int} - 2 \cdot \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma}$$

Finalmente resulta:

$$\begin{aligned} m_{\text{depósito}} &= \left[\pi \left(D_{int} + \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma} \right) \cdot \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma} \cdot \left(L_{\text{max}} - D_{int} - 2 \cdot \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi}{6} \left((D_{int} + 2 \frac{D_{int} \cdot P_{int}}{2 \cdot \sigma})^3 - D_{int}^3 \right) \right] \cdot \rho_{\text{mat}} \end{aligned}$$

Una vez expresadas las dos ecuaciones principales que intervienen en el dimensionamiento de los depósitos, resta reflejar las **condiciones del almacenamiento**. Se tomarán como **condiciones iniciales de referencia** las siguientes:

- **Material:**

Acero aleación de alta resistencia ASTM A514. Densidad = 7800 kg/m³

Límite de rotura $\sigma = 760$ MPa (se aplicará un factor de seguridad para minorar la tensión máxima a soportar de 1.20). Límite de rotura para el cálculo: $\sigma = 633.3$ MPa

- **Presión** de almacenamiento: 200 bar (20 MPa)
- **Temperatura** ambiente (temperatura del depósito tras la carga): 15° C (298 K)
- **Factor de compresibilidad Z** (20 MPa y 15°C). Hallado en el apartado anterior: 0.73
- **Densidad del gas**. Calculada anteriormente para estas mismas condiciones: 212.12 kg/m³
- **Masa de gas combustible** a almacenar: 30.5 kg
- **Longitud máxima** disponible para los depósitos, restando del total geométrico disponible la longitud de las válvulas: 0.95 m (1 m disponible, 0.05 m dedicados a valvulería).

Una de las variables principales en el dimensionado es el número de depósitos entre los que repartir el combustible necesario. Para facilitar el cálculo, inicialmente se llevará a cabo considerando que todos los depósitos sean de las mismas dimensiones y alberguen la misma cantidad de masa.

Para dimensionar unitariamente cada depósito, se empleará la ecuación anterior para el cálculo del D_{int} , teniendo en cuenta que cada depósito alberga V_{int}/N , siendo N el número total de depósitos.

$$D_{int} = \sqrt{\frac{\frac{V_{int}}{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(L_{\text{max}} + \left(\frac{2}{3} - \lambda \right) \right) \cdot D_{int}}}$$

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO

A continuación se evalúa la disposición del combustible entre 1 y 8 depósitos, comprobando cómo el aumento del número influye en la masa total de los depósitos, el diámetro interior y el espesor. Se estudia la influencia de las variaciones de las condiciones de diseño iniciales sobre la masa total y el diámetro de los depósitos de almacenamiento. Para ello se toman cuatro situaciones con diversas condiciones, para conocer el comportamiento de cada uno de los parámetros:

1. **Condiciones iniciales** descritas anteriormente, considerando entre 1 y 8 depósitos.
2. **Variación de la longitud máxima disponible.** Longitud disponible: 0.95 m en lugar de 1 m.
3. **Variación de la presión.** La presión de almacenamiento aumenta hasta 250 bar. Influirá en las condiciones internas del almacenamiento.
4. **Variación de la temperatura.** La temperatura pasa de 15° C a 40° C. Influirá en las condiciones internas del almacenamiento.

Variación de las condiciones iniciales:

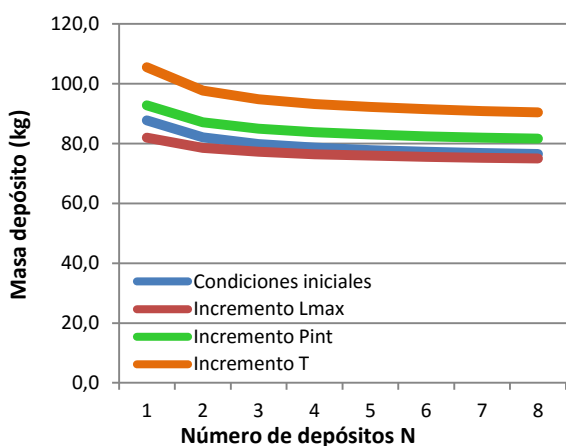


Gráfico 18. Evolución de la masa del depósito en función de las condiciones

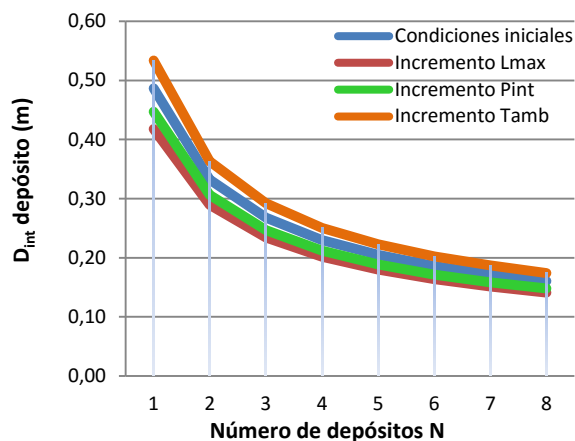


Gráfico 19. Evolución del diámetro interior del depósito en función de las condiciones

Los resultados obtenidos al modificar las condiciones de cálculo se han representado en el Gráfico 18 y Gráfico 19 y se comentan a continuación:

1. Efecto de la longitud máxima disponible. Al aumentar la longitud máxima disponible, lo que se consigue es proporcionar mayor volumen útil longitudinalmente sin apenas aumentar las sollicitaciones de las paredes. Esto se traduce en que, para un mismo volumen a albergar en los depósitos, el diámetro interior y, en consecuencia el espesor de la pared y la masa total, se reducen.

$$D_{int} = \sqrt{\frac{V_{int}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(L_{max} + \left(\frac{2}{3} - \left(1 + \frac{P_{int}}{\rho_{mat}} \right) \right) \cdot D_{int} \right)}}$$

2. Efecto de la presión interna (aumento hasta 250 bar). Si se aumenta la presión interna, la densidad del gas almacenado también lo hará y, en consecuencia, el diámetro interior y el volumen ocupado se reducirán. Aunque también aumenta el factor de compresibilidad (desde 0,73 a 0,78, su incidencia sobre la densidad es menor, por lo que globalmente se traduce en un aumento de la densidad del gas en el interior del depósito.

$$\rho = \frac{P}{Z \cdot R \cdot T}$$

↑ P → ↑ Z

Aunque la reducción del diámetro del depósito y con ella del espesor, parece conducir a una reducción de la masa del depósito, hay que tener en cuenta que el aumento de presión provoca una mayor sollicitación de las paredes, lo que hará aumentar su espesor. En el Gráfico 18 y el Gráfico 19 se aprecia cómo, para el aumento de la presión interna, el diámetro interior se reduce con respecto a las condiciones iniciales, mientras que la masa total de los depósitos aumenta debido al aumento de espesor.

N	Condiciones iniciales (200 bar)			Aumento de P _{int} (250 bar)		
	m (kg)	D _{int} (m)	e _{pared} (mm)	m (kg)	D _{int} (m)	e _{pared} (mm)
1	87,80	0,487	7,7	92,73	0,447	8,8
2	82,03	0,332	5,2	87,16	0,306	6,0
3	79,84	0,268	4,2	85,01	0,247	4,9
4	78,62	0,230	3,6	83,81	0,212	4,2
5	77,82	0,205	3,2	83,02	0,189	3,7
6	77,25	0,186	2,9	82,45	0,172	3,4
7	76,81	0,172	2,7	82,02	0,158	3,1
8	76,47	0,160	2,5	81,68	0,148	2,9

Tabla 14. Comparativa de la influencia de la presión en el D_{int} y la masa de los depósitos

3. Efecto de la temperatura (aumento hasta 40°C). Se puede apreciar que cuanto mayor es la temperatura, más desfavorables son las condiciones de almacenamiento. Un aumento en la temperatura reduce directamente la densidad de almacenamiento y aumenta el factor de compresibilidad (desde 0,73 hasta 0,80, lo que también contribuye en la reducción de la densidad. En las gráficas se aprecia claramente cómo se incrementan tanto el diámetro interior de los depósitos como la masa de los mismos.

$$\rho = \frac{P}{Z \cdot R \cdot T}$$

$$\uparrow T \rightarrow \uparrow Z$$

Al tratarse de una condición ambiental, la temperatura está condicionada por el clima de utilización del vehículo. Llegado el caso de empleo en lugares extremos, puede considerarse la inclusión de un sistema de refrigeración para mantener los depósitos a una temperatura adecuada.

ESTUDIO DEL MATERIAL DE LOS DEPÓSITOS

A continuación se comparan los dos materiales más empleados para la realización de depósitos de gas natural comprimido: acero y aluminio. Del estudio resultará cuál de ellos es el mejor candidato en función de la masa total y el volumen total ocupado:

1. *Acero aleación de alta resistencia ASTM A514.* Densidad = 7800 kg/m³

Límite de rotura $\sigma = 760$ MPa (se aplicará un factor de seguridad para minorar la tensión máxima a soportar de 1.20). Límite de rotura para el cálculo: $\sigma = 633.3$ MPa

2. *Aleación de aluminio 2014-T6 reforzado con fibra.* Densidad = 2800 kg/m³ (la masa y espesor de la fibra se consideran despreciables)

Límite de rotura $\sigma = 483$ MPa (se aplicará un factor de seguridad para minorar la tensión máxima a soportar de 1.20). Límite de rotura para el cálculo: $\sigma = 402.5$ MPa

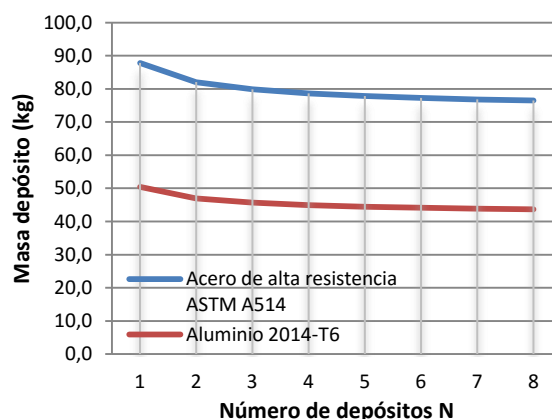


Gráfico 20. Comparativa de la masa del depósito para acero y aluminio

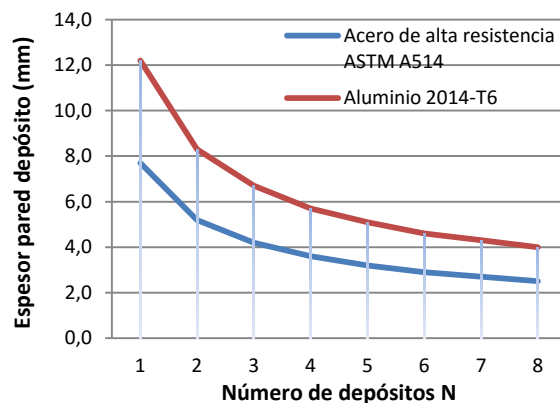


Gráfico 21. Comparativa del espesor de la pared del depósito para acero y aluminio

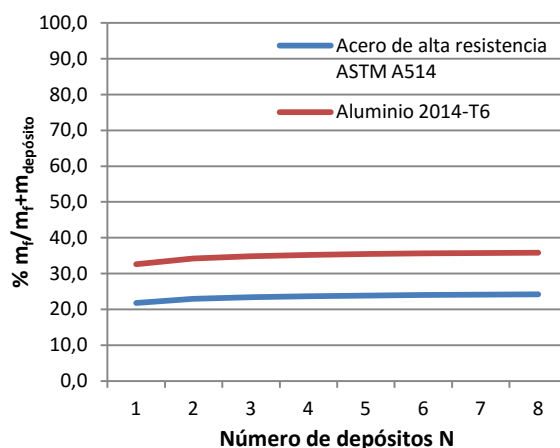


Gráfico 22. Porcentaje que supone la masa del combustible respecto a la masa total del sistema de almacenamiento, según el número de depósitos, para acero y aluminio

Puesto que las condiciones internas de almacenamiento no varían en ambos casos, el diámetro interior de los depósitos será el mismo, ya que tendrán que albergar el mismo volumen.

Como se puede observar en el Gráfico 20, pese a la menor tensión de rotura que presenta el **aluminio**, su baja densidad provoca que la masa de los depósitos construidos con este material sea muy inferior a los de acero.

La menor tensión de rotura del aluminio conlleva un aumento de espesor en las paredes (Gráfico 21). Sin embargo, se trata de un aumento de pocos milímetros, por lo que este hecho no condiciona en exceso el diámetro exterior de los depósitos y con ellos el volumen que ocuparán en el vehículo.

Por último, destaca el parámetro representado en el Gráfico 22, que muestra el porcentaje que supone la masa del combustible (30,5 kg) en el total del conjunto almacenamiento más combustible, resultando mayor en el caso del aluminio.

Todos estos hechos conducen a la elección del aluminio 2014-T6 como el material más adecuado para los depósitos de combustible, gas natural comprimido a 200 bar. El aluminio, además, por su alta conductividad térmica ayuda a eliminar rápidamente el calor generado durante la carga de combustible.

ELECCIÓN DEL NÚMERO DE DEPÓSITOS Y SU DISPOSICIÓN EN EL VEHÍCULO

Elegidas las condiciones de almacenamiento y el material del depósito, únicamente quedará escoger el número de depósitos en los que se repartirá el total de combustible, y su disposición en el vehículo en función de los espacios disponibles.

Existen dos espacios disponibles en el Renault Captur para cumplir con la función de albergar los depósitos de gas natural:

1. **Espacio bajo el piso** (zona del depósito de gasolina): Se trata de la zona ocupada por el depósito de gasolina en la versión inicial del vehículo. Al remover dicho depósito, y siendo necesaria

una nueva distribución del resto de elementos situados en la zona, puede considerarse un espacio disponible de 1m x 0.526m x 0.193m.

2. **Maletero:** El maletero tiene un volumen total de 455 litros. Cuenta con un doble fondo, con unas dimensiones aproximadas de 1m x 0.55 x 0.18 (m), que resulta idóneo para incorporar alguna de las botellas de almacenaje de combustible sin reducir drásticamente el volumen del maletero. Se estarían reduciendo aproximadamente 99 litros del volumen total, pero aún quedaría un gran porcentaje del volumen total completamente utilizable.



Ilustración 28. Maletero del Renault Captur con el doble fondo disponible para albergar depósitos

La elección del número de depósitos se llevará a cabo en base a la masa total que supongan los depósitos y las dimensiones exteriores de los mismos, estableciendo la limitación de los espacios disponibles anteriormente citados. Al realizarse el almacenamiento en bombonas cilíndricas, se considerará como espacio real ocupado por ellas y, por tanto, no aprovechable para otros usos, los prismas cuadrangulares circunscritos a ellas. Todos los gráficos han sido realizados para depósitos de aluminio 2014-T6.

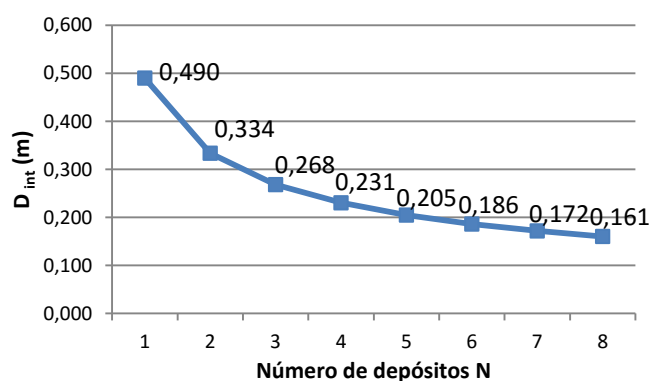


Gráfico 23. Evolución del D_{int} con el número de depósitos (Al)

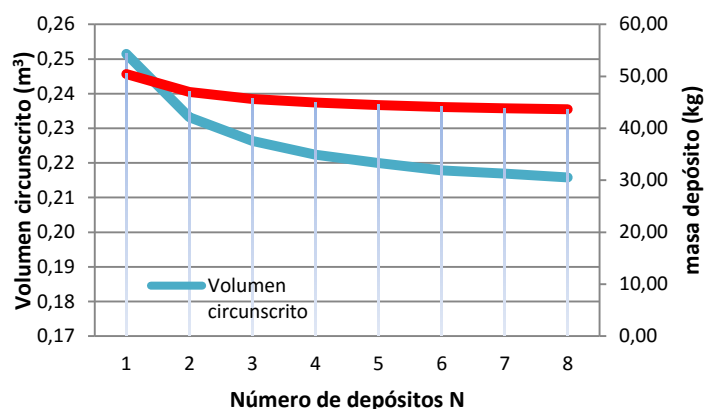


Gráfico 24. Evolución del volumen circunscrito y la masa del conjunto de depósitos en función de su número

El Gráfico 23 y el Gráfico 24 muestran la evolución del diámetro interno de los depósitos y de la masa del conjunto a medida que se incrementa el número de depósitos. Ambos parámetros están relacionados, ya que la masa depende directamente del espesor y éste, a su vez, del diámetro interno. Se puede apreciar como la masa se reduce de forma importante con los primeros incrementos del número de depósitos, y de forma más leve después.

Al aumentar el número de depósitos, el volumen a albergar en cada uno de ellos se divide por N, por lo que el nuevo diámetro interior se puede calcular a partir de la expresión:

$$D_{\text{int}} = \sqrt{\frac{\frac{V_{\text{int}}}{N}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left(L_{\text{max}} + \left(\frac{2}{3} - \left(1 + \frac{P_{\text{int}}}{\rho_{\text{mat}}} \right) \cdot D_{\text{int}} \right) \right)}}$$

Es decir, el diámetro interior se reduce aproximadamente como:

$$D_{\text{int}} \sim f\left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)$$

Sin embargo, el diámetro no se reduce exactamente como $\frac{1}{\sqrt{N}}$, ya que el propio D_{int} también aparece en la parte derecha de la expresión.

Esto conduce a que el volumen circunscrito ocupado también se vaya reduciendo Gráfico 24.

Otro modo de representar esta tendencia es mediante el Gráfico 25, que muestra el poder calorífico del combustible, no por unidad de masa de combustible, sino por unidad de masa del conjunto total de almacenamiento (depósito más combustible). Se observa cómo aumenta a medida que se incrementa el número de depósitos.

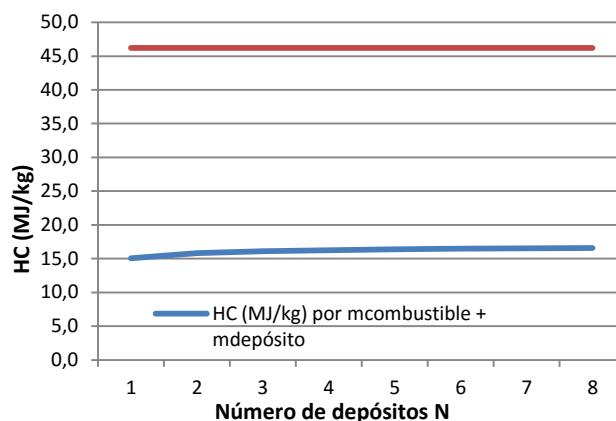


Gráfico 25. Poder calorífico por unidad de masa total del almacenamiento ($m_{\text{combustible}} + m_{\text{depósito}}$)

Todo ello **conduce a buscar una solución basada en el mayor número posible de depósitos**, ya que los dos parámetros de mayor importancia, masa y volumen ocupado, se reducen. Sin embargo hay que considerar que aumentar el número de depósitos implica mayor coste, así como más conductos y válvulas, con peso y coste asociado. Sin embargo, la decisión no se efectuará en base a esto, sino al máximo número de depósitos que, por sus dimensiones, el vehículo permita albergar.

Las dimensiones máximas de los conjuntos, tomando las referencias mínimas de los dos espacios identificados en el vehículo son las siguientes:

Dirección	Dimensiones máximas (m)
Longitudinal (X)	0,526
Transversal (Y)	0,950
Vertical (Z)	0,180

Tabla 15. Dimensiones máximas disponibles

A continuación las dimensiones obtenidas para el almacenamiento en depósitos de aluminio.

N	m (kg)	D _{int} (m)	e _{pared} (mm)	D _{ext} (m)
1	50,45	0,490	12,2	0,515
2	46,97	0,334	8,3	0,350
3	45,66	0,268	6,7	0,282
4	44,94	0,231	5,7	0,242
5	44,46	0,205	5,1	0,215
6	44,12	0,186	4,6	0,196
7	43,86	0,172	4,3	0,181
8	43,66	0,161	4,0	0,169

Tabla 16. Dimensiones de los depósitos de aluminio

Las principales limitaciones vienen dadas por la altura Z disponible en ambas zonas, que limita el diámetro exterior del depósito, y la distancia longitudinal X, que limita la disposición de varios cilindros de forma consecutiva.

Para el **aluminio**, la limitación de espacio vertical ($Z=0.180\text{m}$) obliga a descartar las soluciones con N comprendido entre 1 y 7. La solución con 8 depósitos obliga a disponer 4 cilindros de forma consecutiva en cada uno de los dos espacios, por lo que la distancia necesaria en dirección longitudinal (X) sería de 0.676m, lo que supera ampliamente los 0.526 m disponibles bajo el piso y los 0.55 m de la zona del doble fondo del maletero.

Si se replantea para el **acero**, aceptando el aumento de peso en aras de poder adaptar el volumen disponible, únicamente se reduce el espesor de los depósitos, ya que la cantidad de combustible a albergar es el mismo (mismas condiciones de almacenamiento). En la opción de 6 depósitos, el cambio de material a acero únicamente repercutiría en una reducción del espesor de 4.6 mm a 2.9, que se traduce en un diámetro exterior de 192 mm. Estas dimensiones siguen excediendo la dimensión en Z del doble fondo del maletero, y aunque sí sería posible en la zona bajo piso atendiendo a Z, la suma de los 3 depósitos a colocar otorgaría una X de 0.576 m, que nuevamente exceden los 0.526 m disponibles.

Por tanto, **tanto con aluminio como con acero**, la única solución posible para evitar ocupar el espacio principal del maletero y reducir drásticamente su utilidad, pasa por reducir la masa de combustible a almacenar y consecuentemente, la autonomía del vehículo.

Para tener una primera estimación, se reducirá inicialmente un 20% la masa de combustible, en busca de optimizar la relación espacio disponible/masa de combustible.

La masa inicial de 30.5 kg se reducirá hasta un 80%: 24.40 kg. Las nuevas dimensiones obtenidas con aluminio serán:

N	m (kg)	D _{int} (m)	e _{pared} (mm)	D _{ext} (m)
1	39,28	0,432	10,7	0,454
2	36,96	0,296	7,4	0,311
3	36,07	0,238	5,9	0,250
4	35,57	0,205	5,1	0,215
5	35,24	0,182	4,5	0,191
6	35,00	0,166	4,1	0,174
7	34,82	0,153	3,8	0,161
8	34,68	0,143	3,6	0,150

Tabla 17. Dimensiones de los depósitos de aluminio para un 80% de combustible

Se concluye que incluyendo un **80% de la masa de combustible prevista inicialmente**, las dimensiones para la distribución en seis depósitos pueden adaptarse perfectamente a los espacios disponibles en el vehículo.

N	D _{int} (m)	e _{pared} (mm)	D _{ext} (m)	% masa inicial	m final (kg)	m depósito (kg)
6	0,166	4,1	0,174	80%	24,40	35,00

Una vez hallado la masa total del conjunto depósito más combustible, 24.4kg de combustible + 35kg de depósito, se analiza el efecto que el aumento de masa del depósito tiene sobre la energía requerida por el vehículo para el desplazamiento y cuáles son el nuevo consumo real y la nueva autonomía.

El peso del combustible es inferior al del equivalente de gasolina, y el añadido del depósito es asumible (un ocupante tiene una masa media de 70kg). Por ello, puede suponerse acertada la hipótesis de que el vehículo, tras la conversión, pueda tener unas necesidades de energía en rueda similares a los del vehículo inicial. Por tanto, no será necesario realizar iteraciones para implementar la masa total del nuevo almacenamiento y calcular nuevamente el consumo de energía en rueda, y con ello, otra vez el almacenamiento necesario para una determinada autonomía.

Sin embargo, se calculará el consumo real y la nueva autonomía para poder establecer conclusiones.

Con una masa del conjunto de 59.4kg, el incremento con respecto a la masa del conjunto de gasolina (32.85kg de combustible + 0.5kg de depósito) es de 26 kg.

Este incremento, para el recorrido NEDC se traduce en consumo en rueda de 127.31Wh/km, que conllevan la necesidad de aportar al motor:

$$\frac{E_{\text{combust.}}(\text{Wh})}{\text{km recorrido}} = \frac{E_{\text{ruedas}}(\text{Wh})}{\eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{trans}} \cdot \text{km recorrido}} = \frac{127.31 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}}{0.267} = 476.82 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$$

La energía almacenada con 24.40 kg de combustible es:

$$E_{\text{combust.}}(\text{Wh}) = 12.840 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} \cdot 24.4\text{kg} = 313.296\text{Wh}$$

Lo que otorga al vehículo una autonomía de:

$$\text{Autonomía (km)} = \frac{313.296\text{Wh}}{476.82 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}} = 657.1\text{km}$$

$$\frac{657.1\text{km}}{833.3\text{km}} \cdot 100 = 78.85\%$$

Es decir, la autonomía se ha reducido un 21.15% respecto a la prevista inicialmente, consecuencia de reducir en un 20% la cantidad de combustible a almacenar por un lado, y al ligero incremento de consumo de combustible asociado al sobrepeso por el depósito de aluminio.

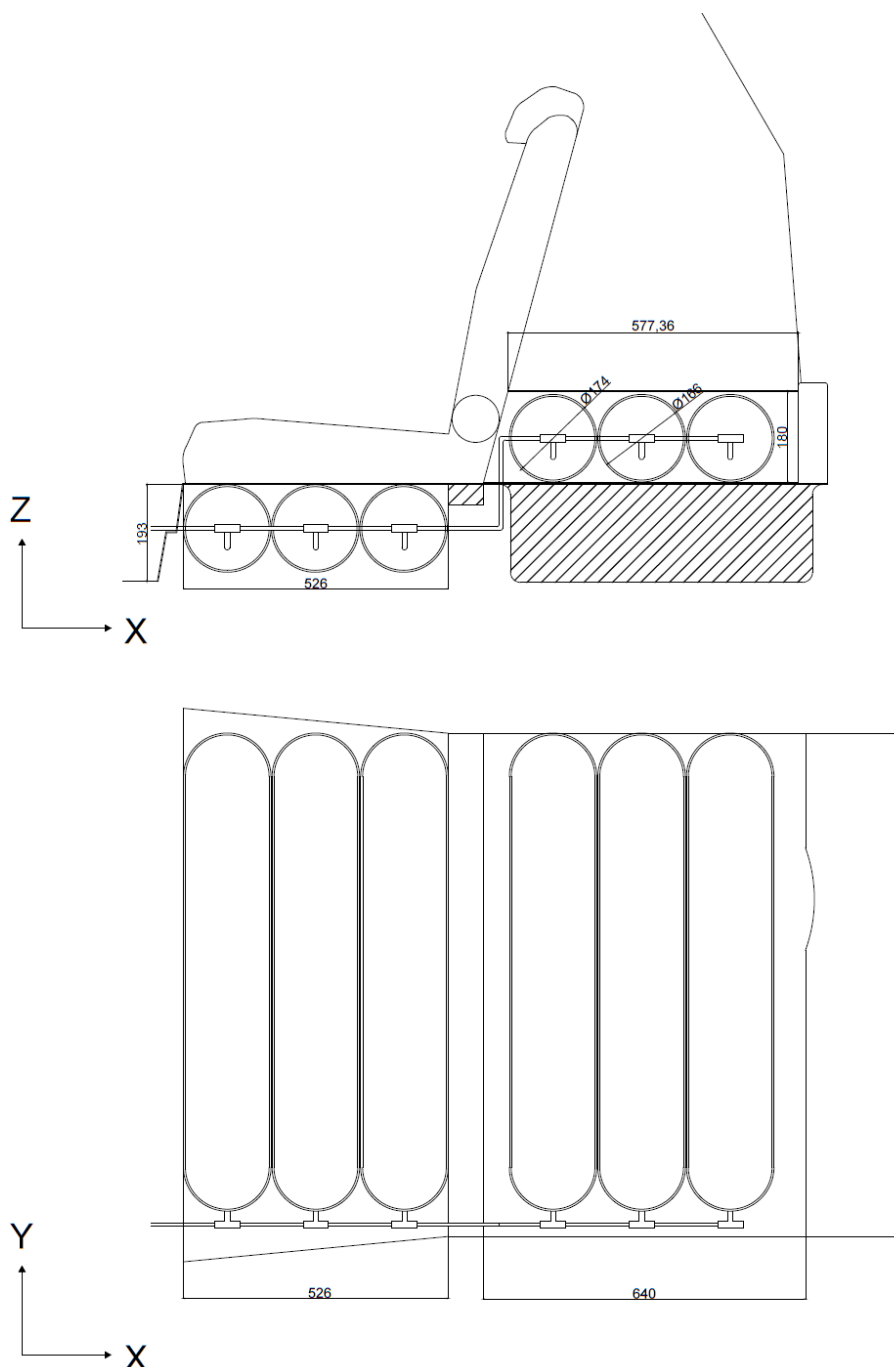


Ilustración 29. Disposición final de los depósitos de gas natural comprimido

4.3 Análisis de los resultados

La conversión de un vehículo de gasolina a un vehículo monovalente impulsado por gas natural comprimido plantea varios aspectos en el almacenamiento del combustible.

En lo referente al combustible, la conversión resulta idónea, ya que el mayor poder calorífico por unidad de masa del gas natural, hace que se requiera menor masa para otorgar la misma autonomía al vehículo.

Sin embargo, el principal problema se plantea a causa del estado gaseoso del combustible, que en unas condiciones de almacenamiento según la reglamentación ECE R110, 200 bar y 15°C, requiere **un volumen tres veces superior al que requiere la gasolina** por su condición de estado líquido.

Desde el punto de vista del almacenamiento, la conversión presenta una importante dificultad. Las zonas disponibles en el vehículo para albergar los nuevos depósitos, conllevan reducir el volumen del maletero, aunque únicamente en su doble fondo, y a rediseñar la arquitectura bajo el piso para adaptarla al nuevo almacenamiento.

Almacenar la cantidad inicial de combustible que aseguraba mantener la misma autonomía que el vehículo inicial resulta imposible, por lo que se ha tenido que recurrir a reducirla. De este modo, la energía almacenada es inferior y con ello, también la autonomía. Además, se aumenta ligeramente el peso del vehículo, por lo que el requerimiento de energía es mayor.

También será necesario replantear las fijaciones atornilladas de los depósitos al chasis del vehículo.

	Gasolina	Gas Natural Comprimido
Masa combustible (kg)	32,85	24,4
Masa depósito (kg)	0,5	35
Masa conjunto (kg)	33,35	59,4
Energía almacenada (kWh)	391,65	313,30
Autonomía prevista (km)	833,33	657,1
Volumen disponible en el maletero (L)	455	356

Ilustración 30. Prestaciones finales de autonomía, volumen de maletero y masa del almacenamiento de combustible

Se puede concluir que, en los aspectos relacionados con el almacenaje, aparece una de las principales desventajas de la conversión, pues conlleva la inversión de replantear la situación de algunos elementos, la reducción del espacio útil del maletero en un 23% y un ligero aumento de peso de 30 kg (2.4% de la masa en orden de marcha del vehículo).

Sin embargo, también son muchas las ventajas generadas por la conversión y que plantean el debate de su viabilidad y rentabilidad.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales y específicas

Se pueden establecer dos tipos de conclusiones fundamentales consecuencia del presente trabajo: Unas **generales** referentes a las características del gas natural como combustible y otras más **específicas** en función de los cálculos y estudios realizados.

CONCLUSIONES GENERALES

Respecto a las características del gas natural como combustible para motores, destacan los siguientes factores, que pueden verse claramente diferenciados en ventajas e inconvenientes:

- **VENTAJAS**

Existe una importante **disminución de las emisiones** fruto de la combustión: Las emisiones de CO₂ se reducen en un 21% con respecto a motor de gasolina. Las emisiones contaminantes también se reducen en gran medida, CO, NO_x, HC y una emisión de partículas prácticamente nula, además de una importante reducción de muchas sustancias no limitadas actualmente. Esto da respuesta a los problemas de contaminación en las ciudades, convirtiendo al gas natural en un excelente combustible para la circulación urbana.

Existe un importante **ahorro energético**, con un menor consumo de combustible, aún empleando mezcla estequiométrica. Con un régimen de giro menor para la zona de funcionamiento óptimo, se alcanzan valores de consumo energético hasta un 19% inferiores a un motor de gasolina. Existe la posibilidad de funcionar con mezclas pobres aumentando aún más el rendimiento, aunque penalizando la potencia.

El escaso gravamen al que se ve sometido el combustible lo convierte en una alternativa muy económica, con **precios un 50% inferiores** a la gasolina en €/kg. A la fecha de realización del presente trabajo, el precio del kg de gas natural comprimido en España se encuentra a 0.86 €/kg, muy por debajo del precio de la gasolina, 1.15 €/L (1.58 €/kg). La inversión adicional que supone adquirir un vehículo con GNC puede verse rentabilizada a los 80.000km. Existen además otros incentivos fiscales y ayudas para la adquisición de vehículos con combustibles alternativos, que facilitan su apertura al mercado.

Los **vehículos son incluso más seguros** que los que emplean combustibles tradicionales, pues los elementos de mayor sollicitación, como son los elementos del sistema de almacenamiento, son debidamente testados para proceder a su homologación, siendo mucho más robustos que los depósitos de combustibles líquidos. El combustible es más ligero que el aire y sumamente volátil, por lo que es muy complicado que se produzca un incendio. Además, el intervalo de composición en el aire en el que puede inflamarse es entre 5 y 15%, un rango menor que en el caso de gasolina, entre 1 y 16%, siendo mucho mayor la temperatura necesaria para producirse, 600°C, frente a los 315°C que requiere la gasolina.

Permite emplear motores de gasolina con leves variaciones, además de permitir funcionar con ambos combustibles. La alternativa bi-fuel, con gasolina para mantener una cierta autonomía en caso de emergencia, es la de mayor aceptación en Europa actualmente.

La explosión de la combustión es menos intensa a causa de la mezcla más homogénea y la mejor repartición de la carga, por lo que el **motor es mucho menos ruidoso**. Este mismo hecho conduce a una mayor durabilidad del motor y un menor coste de mantenimiento.

El eficiente **sistema de repostaje**, con mangueras totalmente estancas, elimina las pérdidas por volatilización del combustible.

Las **reservas de los yacimientos de gas natural** permiten un suministro estimado de 60 años, lo que supera con creces a las reservas de petróleo. Además permite la obtención de biometano, con el que los motores adaptados para uso de gas natural son 100% compatibles.

- **INCONVENIENTES**

El **almacenamiento** del gas natural lleva asociado varios problemas: la alta presión de los tanques conlleva requisitos especiales para el depósito y revisiones de seguridad; el estado gaseoso del combustible necesita disponer de un gran volumen, lo que se traduce en un replanteamiento de la arquitectura del vehículo para albergar los depósitos, y en la mayoría de los casos, a renunciar a espacio en la habitabilidad del vehículo, frecuentemente en el maletero. La dificultad para albergar los depósitos sin renunciar a habitabilidad interior puede conllevar tener que sacrificar autonomía en el vehículo.

Necesidad de **revisiones periódicas** para comprobar el estado de los **depósitos de almacenamiento**. Si bien, este hecho puede ser visto como una ventaja, pues ayuda a prever posibles problemas en el sistema que puedan ocasionar riesgos para la seguridad, algo que no se realiza con asiduidad en el caso de combustibles líquidos.

Puede existir un problema asociado al uso del **catalizador de tres vías**. En el caso del gas natural, la **temperatura requerida** para la conversión total de los hidrocarburos es ampliamente **superior** al caso de la gasolina. El problema surge con la reducción de la temperatura de los gases de escape, lo que puede provocar una temperatura insuficiente en el catalizador e impedir una adecuada conversión de los hidrocarburos sin quemar. Esta problemática se acrecienta con el efecto del envejecimiento del catalizador, que causa un mayor requerimiento de temperatura para realizar la conversión.

La **infraestructura de abastecimiento** de combustible en España, está muy **poco desarrollada**, contándose actualmente con tan solo 42 puntos de suministro de GNC.

Los puntos de abastecimiento y talleres de reparación necesitan tomar **medidas adicionales de seguridad** para poder detectar fugas de metano y contar con dispositivos para actuar en atmósferas explosivas; además de contar con un adecuado sistema de ventilación.

El **precio de adquisición** del vehículo es **superior** a la de uno de gasolina, o en su caso, la inversión para la adaptación del vehículo de gasolina al empleo de gas natural. Aunque, como se ha visto, la inversión puede rentabilizarse a partir de los 80000km a causa del bajo precio del combustible.

CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Existe una ligera **pérdida de prestaciones en términos de potencia** con respecto a la otorgada por el motor de gasolina (12.7%). Esta reducción es fruto principalmente de la menor fracción molar de aire en la mezcla, a causa del estado gaseoso del combustible. Es necesario realizar una serie de modificaciones en numerosos parámetros del motor y resto de componentes para optimizar su funcionamiento al uso del gas natural y solventar la diferencia: sobrealimentación, relación de compresión... lo que conlleva aumentar la inversión necesaria.

Al trasladarse la zona óptima de funcionamiento a un régimen de giro menor, es **necesario variar la caja de cambios** para equipar una con menor reducción de la velocidad de giro. Puede optarse por utilizar una de las cajas que emplea Renault específicamente para motores diesel.

Después de un cálculo pormenorizado del **sistema de almacenamiento**, evaluando la influencia de la variación de las condiciones y estudiando alternativas de materiales, queda patente la dificultad de albergar los depósitos de gas natural comprimido en una arquitectura que no ha sido diseñada para ello. Las limitaciones de espacio impiden albergar los 142,5 L necesarios para mantener la autonomía inicial del vehículo, por lo que se tiene que **renunciar a un 21% de la autonomía**, además de utilizar 99L del volumen total del maletero (22% del total). La disponibilidad de un doble fondo del vehículo Renault Captur permite, al menos, no interferir en el espacio principal del maletero. Los importantes espesores requeridos para soportar la sollicitación debida a la elevada presión de almacenamiento conllevan un ligero aumento de la masa del vehículo (35 kg).

Se demuestra que el gas natural, gracias a su elevado porcentaje de metano, cuenta con un **factor de emisiones de CO₂ mucho más bajo que la gasolina** (2.66 gCO₂/g_{GN} frente a 3.08 gCO₂/g_{gasolina}). Esto se traduce en una reducción de los 120 gCO₂/km emitido por el vehículo de gasolina, a los 97 gCO₂/km que emite para gas natural (reducción del 21%). También son inferiores las emisiones well to tank, lo que sitúa el factor global muy a favor del gas natural.

5.2 Principales aportaciones del autor del TFM

Además del **compendio descriptivo** de todo lo relacionado con los elementos del sistema de almacenamiento y alimentación de gas natural, y las características derivadas del funcionamiento con dicho combustible, ha de añadirse todos los **cálculos y estudios realizados**.

Se ha realizado un **cálculo pormenorizado del almacenamiento**. Para ello, a partir de la composición de referencia del gas natural utilizada, se han hallado todos sus parámetros, propiedades pseudoreducidas, masa molecular y el poder calorífico del combustible por unidad de masa. Con estos datos se han obtenido las condiciones de almacenamiento, con las que se han calculado las dimensiones y espesores de los depósitos de almacenamiento, realizando el estudio para escoger el material idóneo y observar la influencia de las condiciones.

Del mismo modo se ha llevado a cabo el **diseño de los depósitos** y la adaptación al espacio disponible, en función del número y dimensiones.

Se ha elaborado un **estudio económico sobre la rentabilidad** de adquirir un vehículo propulsado por gas natural, según los costes del combustible, mantenimiento e inversión inicial.

Se han obtenido las **emisiones de CO₂ con el gas natural** para poder establecer una comparativa con las del vehículo inicial de gasolina.

También se ha realizado el **cálculo de la nueva potencia del motor** para las nuevas características del combustible, para efectuar la comparación con el vehículo de gasolina.

5.3 Sugerencias para trabajos futuros

En el presente trabajo no se ha profundizado en la conversión del motor de encendido provocado de gasolina para emplear gas natural comprimido, más allá de recoger estudios previos en la materia y efectuar los cálculos sobre la disminución de la potencia otorgada o la necesidad de emplear una menor reducción de la caja de velocidades para adaptarse al menor régimen de giro óptimo del motor. Por ello, puede ser una sugerencia acertada ahondar en las variaciones de funcionamiento aquí citadas.

Del mismo modo, aún queda un amplio campo por recorrer para tratar de optimizar las configuraciones bi-fuel y dual fuel con empleo de gas natural comprimido.

Por último, también puede resultar adecuado un estudio de las posibilidades de almacenamiento de gas natural empleando composites. La utilización de nanotubos de carbono adsorbentes puede ser una solución de futuro para reducir el volumen empleado por el gas natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUDELO, John Ramiro; MUÑOZ, Juan; TRUJILLO, Luis. Análisis de viabilidad técnico-económica de la conversión de vehículos a sistemas biocombustible gasolina-gas natural para el caso colombiano. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 2000, p. 35-42.

CASPETA, Luis; BUIJS, Nicolaas AA; NIELSEN, Jens. The role of biofuels in the future energy supply. *Energy & Environmental Science*, 2013, vol. 6, no 4, p. 1077-1082.

CHANDRA, R., et al. Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, no 11, p. 3969-3977.

Cylinders, L. (2016). Luxfer Gas Cylinders - Setting The Standard Worldwide. [online] Available at: <http://luxfercylinders.com>

DELOITTE, Desarrollo del gas natural en España: análisis de beneficios y potencial contribución a la economía nacional, 2015.

Directiva 2005/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 28 de septiembre de 2005

EDWARDS, Robert, et al. JRC Technical Reports. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. SAE Technical Paper, 2014.

GASNAM. (2016) Asociación Ibérica del Gas Natural para la Movilidad. [online] Available at: <http://gasnam.es/>

IDAE, Nuevos combustibles y tecnologías de producción: Situación y perspectivas para automoción". Ed. IDAE. Madrid, 2008.

KIM, Jong Woo. Compressed natural gas engine. U.S. Patent No 5,738,076, 14 Abr. 1998.

KORAKIANITIS, T.; NAMASIVAYAM, A. M.; CROOKES, R. J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, vol. 37, no 1, p. 89-112.

NGVA. (2016). NGVA Europe. [online] Available at: <https://www.ngva.eu>

PAYRI, F.; DESANTES, J.M. Motores de combustión interna alternativos. Capítulo 16. Formación de la mezcla en MEP, Editorial Reverté. 2011

PROBIOGAS, PSE. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España, 2007.

PRZYBYLSKI, J. Gas Natural Comprimido como combustible alternativo en vehículos automotores. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 1995.

Real Decreto 1078/2015

Reglamento nº 110 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE)

Reglamento nº 115 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE)

SANTAMARÍA, John R. Agudelo, et al. Influencia de la tecnología de conversión sobre el comportamiento de motores de gasolina convertidos a gas natural. *Ingeniería y desarrollo: revista de la División de Ingeniería de la Universidad del Norte*, 2002, no 11, p. 28-41.

STANDING, Marshall B., et al. Density of natural gases. *Transactions of the AIME*, 1942, vol. 146, no 01, p. 140-149.

VAN BASSHUYSEN, Richard, et al. *Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains*. Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2016.

Virtuales, A. (2016). GNC - Agas21: El gas natural comprimido como combustible en automoción. [online] Available at: <http://agas21.com>

ANEXOS

REGLAMENTO ECE R110

CONDICIONES DE SERVICIO

Las condiciones normales de servicio establecidas en esta sección se proporcionan para que sirvan de base para el diseño, fabricación, inspección, ensayo y homologación de botellas destinadas a ser instaladas permanentemente en vehículos y utilizadas para almacenar gas natural a temperatura ambiente, para utilizarlo como combustible en vehículos.

Las condiciones de servicio especificadas también tienen por objeto proporcionar información sobre cómo las botellas fabricadas con arreglo al presente Reglamento pueden ser utilizadas con seguridad.

La vida útil durante la cual las botellas serán seguras será especificada por el diseñador de la botella para uso bajo las condiciones de servicios especificadas en este documento. La vida útil máxima será de 20 años.

Recalificación periódica: El fabricante de la botella proporcionará recomendaciones para la recalificación periódica por inspección visual o ensayos durante la vida útil, sobre la base de uso en las condiciones de servicio especificadas en este documento. Cada botella será objeto de inspección visual al menos cada 48 meses después de la fecha de su entrada en servicio en el vehículo (matriculación del vehículo) y en el momento de cualquier reinstalación, para determinar si hay daños externos o deterioro, incluida la zona debajo de las tiras de fijación. La inspección visual será realizada por un organismo competente homologado o reconocido por la autoridad reglamentaria, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Botellas involucradas en colisiones Las botellas que hayan estado involucradas en una colisión de vehículos serán inspeccionadas de nuevo por un organismo autorizado por el fabricante [...]. Las botellas que no hayan sufrido daños en la colisión podrán volverse a poner en servicio y en caso contrario serán devueltas al fabricante para su evaluación.

Botellas involucradas en incendios Las botellas que hayan sido sometidas a la acción del fuego serán inspeccionadas de nuevo por un organismo autorizado por el fabricante o condenadas y retiradas del servicio.

Presiones máximas: La presión de la botella estará limitada por lo siguiente: a) una presión que se establezca en 20 MPa a una temperatura estabilizada de 15 °C; b) 26 MPa, inmediatamente después del llenado, independientemente de la temperatura.

Número máximo de ciclos de llenado Las botellas se diseñarán para ser llenadas un máximo de 1000 veces por año de servicio a una presión estabilizada de 20 MPa (200 bares) y a una temperatura estabilizada del gas de 15 °C.

Rango de temperaturas: La temperatura estabilizada del gas en las botellas podrá variar entre un mínimo de - 40 °C y un máximo de 65 °C. La temperatura de los materiales de la botella podrá variar entre un mínimo de - 40 °C y un máximo de + 82 °C. Las temperaturas de más de + 65 °C deberán estar suficientemente localizadas o ser de tan corta duración que la temperatura del gas en la botella nunca sea nunca superior a + 65 °C, excepto durante el llenado o la descarga, cuando podrán variar más allá de los límites establecidos.

Composición del gas No se añadirá metanol y/o glicol deliberadamente al gas natural. La botella deberá diseñarse para que soporte el llenado con gas natural que cumpla una de las tres condiciones siguientes: a) SAE J1616; b) gas seco: El vapor de agua estará limitado normalmente a menos de 32 mg/m³ con un punto de rocío de - 9 °C a 20 MPa. No habrá límites de componentes para el gas seco, excepto para: sulfuro de hidrógeno y otros sulfuros solubles: 23 mg/m³, oxígeno: 1 % en volumen. El hidrógeno estará limitado al 2 % en volumen si las botellas se fabrican con acero cuya resistencia a la rotura por tracción es superior a 950 MPa; c) gas húmedo: El gas con un contenido de agua superior al indicado en b), cumple normalmente los siguientes límites en cuanto a componentes: sulfuro de hidrógeno y otros sulfuros solubles: 23 mg/m³, oxígeno: 1 % en volumen, dióxido de carbono: 4 % en

volumen, hidrógeno: 0,1 % en volumen. Con gas húmedo será necesario un mínimo de 1 mg de aceite para compresores por kg de gas para proteger las botellas y camisas metálicas de gas.

Superficies exteriores Las botellas no se someterán a una exposición continua a ataques químicos o mecánicos como, por ejemplo, fugas de productos que puedan transportar los vehículos o abrasión intensa debida al estado de la carretera, y cumplirán las normas de instalación reconocidas. Sin embargo, las superficies cilíndricas exteriores pueden verse sometidas inadvertidamente a: a) agua, por inmersión intermitente o salpicaduras de la carretera; b) sal, debido al funcionamiento del vehículo cerca del mar o en sitios donde se utiliza sal para fundir el hielo; c) radiaciones ultravioleta de la luz del sol; d) impactos de grava; e) disolventes, ácidos y álcalis, fertilizantes, y f) líquidos de automoción, inclusive gasolina, líquidos hidráulicos, glicol y aceites.

Permeabilidad al gas o fugas Las botellas pueden estar encerradas en espacios cerrados durante largos periodos de tiempo. Se tendrá en cuenta en el diseño la permeabilidad del gas a través de la pared de la botella o las fugas entre las conexiones finales y la camisa.

REQUISITOS APLICABLES A TODOS LOS TIPOS DE BOTELLAS

El diseño de las botellas cubrirá todos los aspectos pertinentes que sean necesarios para asegurar que todas las botellas producidas según el diseño serán adecuadas para su objeto durante la vida útil especificada.

Diseño El presente Reglamento no contiene fórmulas de diseño ni esfuerzos admisibles, pero requiere demostrar la adecuación del diseño mediante cálculos adecuados y por el hecho de que las botellas superen regularmente los ensayos de material, calificación del diseño, producción y lotes especificados en el presente Reglamento. Todos los diseños asegurarán un modo de fallo con aparición de «fugas antes de la rotura» en condiciones de degradación viable de las piezas sometidas a presión durante el servicio normal. Si se producen fugas en las botellas metálicas o en las camisas metálicas, solo podrán ser debidas al crecimiento de una grieta por fatiga.

Materiales. Los materiales utilizados serán adecuados para las condiciones de servicio especificadas. El diseño no incluirá materiales incompatibles en contacto [...].

Acero. Composición Los aceros estarán tratados con eliminador de aluminio y/o silicio y se producirán según procedimientos encaminados a obtener predominantemente grano fino. La composición química de todos los aceros se declarará y definirá al menos por: a) el contenido de carbono, manganeso, aluminio y silicio en todos los casos; b) el contenido de níquel, cromo, molibdeno, boro y vanadio y cualquier otro elemento de aleación añadido intencionadamente. En el análisis de la fundición no se superarán los límites siguientes: Resistencia a la tracción $< 950 \text{ MPa} \geq 950 \text{ MPa}$ Azufre 0,020 % 0,010 % Fósforo 0,020 % 0,020 % Azufre y fósforo 0,030 % 0,025 % [...] Propiedades de resistencia a la tracción [...]. El alargamiento del acero será como mínimo del 14 %. Propiedades de resistencia al impacto [...].

Aluminio Composición Las aleaciones de aluminio se citarán de acuerdo con el método de la Aluminium Association para un sistema de aleaciones dado. Los límites de impurezas para el plomo y el bismuto en cualquier aleación de aluminio no serán superiores al 0,003 %.

REGLAMENTO ECE R115

Especificaciones relativas al sistema de adaptación al GNC. Requisitos para la instalación de equipo específico para uso de gas natural comprimido en el sistema de propulsión de un vehículo

Un sistema de adaptación al GNC constará al menos de los siguientes componentes: Los componentes indicados en el Reglamento no 110 y definidos como necesarios; el manual de instalación; el manual del usuario final.

El sistema de adaptación al GNC podrá incluir asimismo componentes indicados como opcionales en el Reglamento no 110.

El sistema de adaptación al GNC instalado en el vehículo, de manera adecuada, tal como se define en el citado manual de instalación, cumplirá los requisitos de instalación del Reglamento no 110. Por lo que se refiere a la fijación del recipiente de combustible, se considerará que se cumplen los requisitos del Reglamento no 110, si se cumplen los requisitos del anexo 5 del presente Reglamento.

Emisiones de contaminantes [...]