



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volumen I

Memoria

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

**“Simulación CFD sistema de combustible
Dual-Fuel en MCI (Motor Combustión
Interna)”**

TFG presentado para optar al título de GRADO en
INGENIERÍA MECÁNICA
por **Adrián Yáñez Vallverdú**

Barcelona, 11 de Octubre de 2016

Director: Carlos Ruiz Moya
Departamento de fluidos (DMF)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDICE MEMORIA

RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS.....	1
CAPÍTULO 1: Introducción.....	2
1.1. Motivación.....	2
1.2. Objetivo y alcance del proyecto.....	3
CAPÍTULO 2: Movilidad sostenible	4
2.1. Emisiones gases contaminantes	9
2.1.1. Óxidos de nitrógeno.....	9
2.1.2. Hidrocarburos.....	11
2.1.3. Monóxido de carbono.....	11
2.1.4. Material particulado	12
2.2. Transporte pesado y sus emisiones.....	13
CAPÍTULO 3: Normativa Euro VI	15
CAPÍTULO 4: Precursor Eduardo Barreiros	19
CAPÍTULO 5: Funcionamiento de un sistema Diésel.....	21
5.1. Motor térmico	21
5.2. Elementos y distribución motor Diésel.....	22
5.3. Funcionamiento motor Diésel.....	27
5.4. Descripción ciclo Diésel.....	30
5.5. Rendimiento térmico de los motores Diésel	31
5.6. Combustible diésel.....	32
5.7. Diferencias entre combustible diésel y gasolina.....	33
5.8. Ventajas y desventajas del motor Diésel respecto el motor Otto	34
CAPÍTULO 6: Sistema Dual-Fuel.....	36
6.1. Gas Natural Vehicular (GNV)	37
6.1.1. Beneficios de la instalación del GNV	38
6.1.2. Origen del gas natural.....	39
6.1.3. Beneficios económicos, medioambientales y acústicos del GNV ...	39
6.1.4. Diferencia entre GNC y GNL	40
6.1.5. Consideraciones de seguridad en los combustibles gaseosos	43
6.1.6. Estaciones de servicio gas natural.....	44
6.1.7. Vehículos en España con GNV.....	47
CAPÍTULO 7: Motor Dual-Fuel con GNC	52

7.1.	Ventajas del motor Dual-Fuel con GNC respecto al motor Diésel	53
7.2.	Características específicas	54
7.3.	Componentes y descripción del sistema de combustión compartida diésel-GNC	54
7.4.	Combustión en motores Dual-Fuel	57
7.5.	Ciclo Diésel en Dual-Fuel.....	58
7.6.	Sistema operacional del conductor.....	60
7.7.	Metodología de puesta en funcionamiento.....	61
7.8.	Ejemplos de resultados y ensayos	62
7.9.	Imágenes de la situación del depósito del GNC en camiones y autobuses.	65
7.10.	Empresa: <i>Evarm</i>	65
CAPÍTULO 8: Motor Dual-Fuel con GNL.....		69
8.1.	Elementos y distribución	72
8.1.1.	Depósito GNL	74
8.1.2.	Válvula solenoide del depósito	76
8.1.3.	Válvula de corte manual.....	76
8.1.4.	Filtro del combustible.....	77
8.1.5.	Manómetro.....	78
8.1.6.	Sensor de presión del depósito	78
8.1.7.	Regulador de la presión del gas	78
8.1.8.	Válvula de seguridad del regulador de gas.....	79
8.1.9.	Válvula solenoide de corte de gas, baja presión.....	80
8.1.10.	Sensor de temperatura y presión del combustible en la rampa de combustible.....	80
8.1.11.	Rampa de combustible	81
8.1.12.	Inyectores.....	81
8.1.13.	Tubos de alta y baja presión.....	82
CAPÍTULO 9: Programa CATIA		84
9.1.	Diseño en 2D	86
9.2.	Diseño en 3D	88
9.3.	Piezas diseñadas	90
9.4.	Piezas ensambladas	95
CAPÍTULO 10: Programa LMS Samtech Tea Pipe.....		97
10.1.	Pre-simulación.....	99
10.2.	Paneles utilizados en la simulación.....	103
CAPÍTULO 11: Cálculos y simulaciones.....		109

11.1.	Simulaciones con LMS.....	109
11.1.1.	Simulación de las tuberías.....	110
11.1.2.	Simulación utilizando la optimización	121
11.1.3.	Análisis del modo de vibración.....	127
11.1.4.	Análisis de la respuesta armónica.....	132
11.1.5.	Análisis de la respuesta dinámica	140
CAPÍTULO 12: Ayudas y subvenciones para el uso de GNV.....		145
CAPÍTULO 13: Presupuesto.....		147
13.1.	Amortización de la inversión	147
13.2.	Coste elaboración del proyecto.....	149
CAPÍTULO 14: Conclusiones.....		151
CAPÍTULO 15: Bibliografía		153
17.1.	Referencias bibliográficas	153
17.2.	Bibliografía de Consulta	154

RESUMEN

El siguiente proyecto se centra en la simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), basándose en el sistema de combustible Dual-Fuel en motores de combustión interna.

Se puede observar que está compuesto por tres partes diferenciadas:

En la primera parte se describe la importancia de cuidar el medioambiente a partir de la movilidad sostenible, se conocerán cuatro de los componentes nocivos que son perjudiciales para la salud y se detallará la normativa que los regula.

Una segunda parte desarrollará los componentes y el funcionamiento de los motores Diésel y Dual-Fuel. La justificación de ambos motores está encaminada a poder desarrollar la parte práctica del trabajo.

Una tercera parte donde se define la utilidad de los programas de software empleados, el desarrollo y los resultados de las simulaciones a partir del manejo de estos sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda, los consejos y la mano de terceras personas, gracias a ellos se ha podido realizar un trabajo con la información más adecuada posible.

En especial, agradecer al director del trabajo, que gracias a su empeño, constancia, paciencia e insistencia sobre todo ayudándome a resolver los problemas que he tenido durante estos meses.

Quiero dar las gracias al ingeniero Sr. Francisco de Asís González Balmas por la documentación tan valiosa que me ha facilitado acerca de los motores Dual-Fuel en los autobuses.

También agradecer a la empresa *Evarm* y en especial al Sr. Gerente Francisco R. Giménez, y a sus colaboradores por invitarme a visitar sus instalaciones y sus valiosas explicaciones, "in situ" pude observar parte de la base de este trabajo.

Por último, agradecer de una forma exclusiva a mi familia y amigos por el temple y apoyo en el tiempo transcurrido para completar el trabajo durante los años de estudios de grado.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Desde que era un adolescente, me ha interesado el mundo de la automoción. Mi pasión por el deporte del motor, me ha llevado a interesarme por todo lo referente al campo de la mecánica. Por esta razón cuando me planteé mi futuro profesional, me incliné por estudiar el grado de ingeniería mecánica.

Por otro lado, siempre me ha interesado el ámbito de las energías, sobre todo las energías renovables, pues soy consciente de que se ha de preservar el medio ambiente. Por eso, me gustaría aportar en un futuro medios para mantener y conservar el ecosistema, mediante la utilización de energías renovables o energías que reduzcan la contaminación.

El profesor Carlos Ruiz me permitió hacer un trabajo uniendo estos dos importantes campos; la energía y la automoción. Así, poder aprender sobre estos dos campos y a la vez relacionándolos con los transportes pesados y el gas natural.

En el campo de la automoción podré mejorar mis conocimientos sobre los motores Diésel y Dual-Fuel, conocer a fondo el funcionamiento y los componentes de ambos motores.

En el campo de la energía, será preciso realizar un estudio sobre el combustible diésel y los diferentes tipos de gases vehiculares. Y así conocer sus componentes, las emisiones de gases contaminantes y las normativas que los regulan.

Se utilizarán dos programas: el programa Catia, que permite diseñar los componentes, y el programa LMS Samtech Tea Pipe, que permite realizar las simulaciones computacionales. Ambos permitirán mejorar mis conocimientos y aumentar mi experiencia en la utilidad de programas de software necesarios para mi futuro.

Con este trabajo me propongo aprender a manejar estos sistemas para así tener la opción de poder desarrollar aplicaciones que serán muy necesarias en un futuro cercano. Con el objetivo de mejorar el sistema de estos nuevos motores, y así permitiéndonos obtener una mejor calidad de vida en los próximos años, ofreciendo un importante ahorro económico y mejoras medioambientales.

1.2. Objetivo y alcance del proyecto

Para entender el presente proyecto se ha de clarificar en primer lugar el problema que plantea la contaminación, un problema global que repercute tanto en el ámbito del transporte como en la fabricación de todo tipo de componentes.

En el caso del transporte pesado es absolutamente necesario reducir los niveles de emisiones de diferentes partículas con objeto de poder cumplir las normativas europeas en materia de contaminación.

En la actualidad, con el reto de poder reducir los gases contaminantes, se están desarrollando los motores llamados Dual-Fuel, que utilizan dos tipos de combustible: funcionan con diésel y con GNV (Gas Natural Vehicular).

La utilización del gas es primordial para poder reducir el consumo del combustible diésel.

Mediante la simulación CFD, se realizará la investigación, centrándose en el sistema de combustible entre el depósito y el motor Dual-Fuel. Con el fin de poder generalizar o parametrizar un modelo del sistema de combustible para cualquier tipo de camión. Dicha simulación se hará mediante el programa de la empresa Siemens llamado LMS SAMTECH TEA PIPE y para el diseño de los componentes se utilizará el programa CATIA. Se ejecutará diferentes simulaciones para ver el comportamiento mecánico que tienen las tuberías que hay entre los componentes de un modelo Dual-Fuel con gas natural licuado. Para así poder sacar una conclusión y el aprendizaje de los resultados obtenidos con estas simulaciones.

CAPÍTULO 2: MOVILIDAD SOSTENIBLE

El concepto de movilidad sostenible es cada vez más conocido por todo el mundo. En el siglo pasado las políticas en la Unión Europea empezaron a promover este concepto al darse cuenta de los problemas medioambientales y sociales que estaban surgiendo por la contaminación del aire a causa de los medios de transportes motorizados. Por eso sugirieron la optimización, de forma inteligente y eficiente, del uso de materiales, de la energía e información, y así minimizar los impactos ambientales del transporte urbano e interurbano. Sin olvidarse de cubrir las necesidades de movilidad tanto de mercancías como de personas. Este concepto surge la utilización de alternativas de transportes y de nuevas tecnologías de cara a poder reducir las emisiones de gases contaminantes. Mientras en países, como España, es un concepto que parece novedoso porque desde hace décadas se implantó un esquema de movilidad basado, principalmente, en el coche privado. En cambio, en otros países de la UE como Holanda o Dinamarca se optó por un esquema más sostenible con la utilización de transportes ecológicos como son las bicicletas. La visión y la cultura entre estos países son muy diferentes, aunque cada vez convergen más.

El objetivo principal es la reducción en las emisiones de gases contaminantes, pero esto implica unos objetivos secundarios estrictamente relacionados con el principal, entre los cuales cabe destacar:

- Reducción en el impacto medioambiental. Sobre todo, en el cambio climático. Destrucción de la capa de ozono, disminución de la biodiversidad, el efecto de las lluvias ácidas y el efecto invernadero.
- Mejorar la calidad de vida y reducir los efectos sobre la salud de las personas y animales.
- Mejorar la calidad del aire y la reducción del ruido.
- Evitar la congestión en las carreteras.
- Reducción de la dependencia del petróleo.
- Menor consumo y coste de combustibles fósiles.

Todos estos objetivos se han de cumplir siempre que se pueda responder a las necesidades económicas, sociales y medioambientales que tienen las crecientes necesidades de movilidad. En el caso del transporte terrestre no se ha de ver afectado tanto su funcionamiento como su organización.

A nivel nacional se tiene la Estrategia Española de Movilidad Sostenible (EEMS) implantada el 30/04/2009 por el Consejo de Ministros del Gobierno de España que no es carácter obligatorio, pero recomienda y orienta diversas propuestas de actuación influyendo sobre el transporte en general. Primero explicando cual es la situación y luego describiendo objetivos y medidas. En total son 48 medidas estructuradas en cinco áreas:

- Territorio, planificación del transporte y sus infraestructuras.
- Cambio climático y reducción de la dependencia energética.
- Calidad del aire y ruido.
- Seguridad y salud.
- Gestión de la demanda.

Este documento explica cuáles son los principales impactos sobre el medio ambiente en el transporte:

- Congestión: en las ciudades y las periferias, donde se concentran la mayoría de los habitantes, empleos y servicios.
- Fragmentación de hábitats: ocasionado principalmente por las vías de transporte que dividen los hábitats por zonas. Haciendo más difícil la supervivencia de las poblaciones animales y el deterioro e incluso desaparición de algunas poblaciones vegetales.
- Consumo de energía: el transporte por carretera consume el 80% de la energía que se utiliza para el transporte, mientras que el transporte aéreo solo consume el 14%.
- Emisiones de gases de efecto invernadero: el transporte en general emite el 25,4% de las emisiones totales en España, del cual el 89,2% es por causa del transporte por carretera de esos 25,4%. Mirando solo el

transporte por carretera, el 33,5% de las emisiones son causados por los transportes pesados.

- Emisiones de otros contaminantes: se han reducido las emisiones de otros contaminantes producidos por el transporte como las emisiones de plomo, del monóxido de carbono o de los óxidos de azufre. Pero se está aumentando la emisión de otras partículas como el amoniaco, el dióxido de carbono y los óxidos de nitrosos.

Dado esta documentación del impacto sobre el medio ambiente, se propusieron varios objetivos teniendo en cuenta los tres elementos que son necesarios cumplirlos, como se ha dicho anteriormente:

- Económico: satisfacer las necesidades de movilidad para el cumplimiento de la actividad económica.
- Social: los ciudadanos tengan la accesibilidad de poder cumplir sus servicios con transportes más respetuosos con el medio ambiente.
- Medioambiental: cumplir con la protección del medio ambiente, la salud de los ciudadanos y de los animales.

Los objetivos más importantes en el ámbito de los transportes son:

- Alcanzar unos modelos más sostenibles, pero a la vez impulsando el desarrollo económico y la competitividad.
- Reducir los efectos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para cumplir los objetivos nacionales redactados en el Protocolo de Kioto.
- Mejorar la calidad del aire en el ámbito urbano, reduciendo la concentración de los contaminantes atmosféricos y evitar la superación de los estándares del ruido.
- Mejorar la seguridad en todos los modos de transporte y también mejorar la salud de los ciudadanos y del medio ambiente.
- Promover la utilización de modos de transporte que sean más sostenibles.

Posteriormente, la mayoría de las medidas que se impulsan a partir de estos objetivos, son la búsqueda de la utilización de transportes no motorizados o del transporte público. En la materia del transporte por motor, solamente explica la utilización de nuevas máquinas motorizadas que sean más sostenibles. Aprovechándose de las nuevas tecnologías, los planes que se proponen son:

- La utilización de combustibles de mejor calidad y con menos impacto medioambiental.
- Vehículos menos contaminantes.
- Vehículos más seguros y menos ruidosos.
- Vehículos con menor peso y menor consumo energético.

En el gráfico de la figura 1 se puede ver la distribución de las emisiones de gases de efecto invernadero por sectores en España en el año 2009, donde prácticamente roza el 25,4% de emisiones por transporte de carretera.

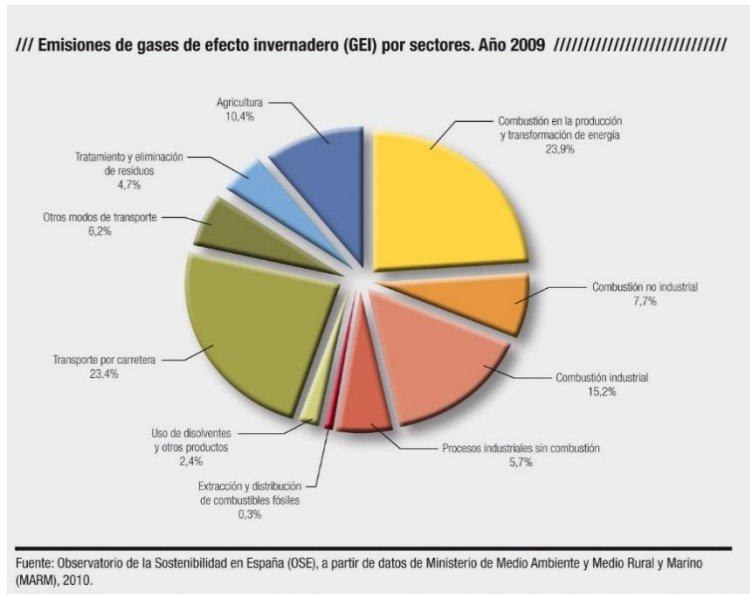


Figura 1. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por sectores. Año 2009.

La no utilización de una movilidad sostenible reporta también problemas ambientales y socioeconómicos de forma global y local. Estos problemas se resumen en un documento elaborado por la Red Española de Ciudades por el Clima que se utiliza de apoyo para la aplicación de la EEMS. Se enuncian estos aspectos:

Tabla 1. Problemas ambientales y socioeconómicos de forma global.

Aspectos ambientales	Aspectos socioeconómicos
Cambio climático por emisión de gases de efecto invernadero	Equidad y conflictos en la distribución de los recursos y los residuos, tanto intrageneracional como intergeneracional
Destrucción de la capa de ozono	Incremento del gasto y la inversión en movilidad en detrimento de otras necesidades sociales
Disminución de la biodiversidad	Escasez de materiales y energía
Lluvias ácidas	

Tabla 2. Problemas ambientales y socioeconómicos de forma local.

Aspectos ambientales	Aspectos socioeconómicos
Contaminación atmosférica	Deterioro de la salud derivada de la contaminación y el ruido
Ocupación de suelos fértiles	Accidentes
Intrusión visual	Miedo, preocupación y estrés en el uso de las calles
Contaminación de suelos y aguas	Deterioro de la salud como consecuencia del sedentarismo
Impermeabilización del suelo	Reducción y perturbación de la comunicación vecinal en el espacio público
Ruptura de las relaciones entre lo urbano y el entorno natural	Disminución de la autonomía de ciertos grupos sociales como niños y ancianos
Fragmentación del territorio y biodiversidad	Reducción de la autonomía de las personas con discapacidad
Ruido	Efecto barrera de las infraestructuras para los vecinos
Calor generado en época estival por los vehículos motorizados en el espacio público	Tiempo dedicado a los desplazamientos
	Equidad en el acceso a los diferentes espacios

En la Unión Europea, a parte de las múltiples iniciativas sobre la sostenibilidad y contaminación en el transporte por carretera se han implantado las normas EURO 1,2,3,4,5 y 6 para coches y EURO I, II, III, IV, V y VI para camiones. Cabe destacar, la obligatoriedad de cumplir el protocolo de Kyoto a nivel mundial. Aunque este protocolo es a nivel general, el trabajo se centrará en las Euro VI que se centran en los límites de contaminación de los medios de transporte terrestres y que afectan directamente a los transportes pesados.

Es muy importante gestionar el transporte en la Unión Europea de una forma eficiente, segura y sostenible. Porque es un ámbito muy importante de cara al buen funcionamiento de la economía europea, pertenecen al 4,8% del valor añadido bruto (equivalente a 548.000 millones de euros) y genera más de 11 millones de puestos de trabajo en toda Europa. Los objetivos que tienen son muy similares a los establecidos en España, pero con la diferencia de igualar la competencia, la eficiencia, la calidad y las infraestructuras entre los países de la Unión Europea. Para que todos los países estén en un mercado único en el ámbito del transporte.

2.1. Emisiones gases contaminantes

Las emisiones de los gases contaminantes provienen de alguna de estas fuentes de contaminación:

- Fuentes naturales: el hombre en estas fuentes no tiene ninguna intervención ni tampoco es capaz de evitarlas. Estas son las erupciones volcánicas e incendios forestales. También son la erosión de la tierra y las tormentas de arena que desprenden partículas al aire. Estas fuentes expulsan una gran cantidad de contaminación, más que las forzadas por el hombre, pero son casuales.
- Fuentes naturales aceleradas por la actividad humana: son las fuentes naturales pero que son provocadas o aceleradas por el hombre. Por ejemplo, los incendios forestales o la desertización.
- Fuentes antropogénicas: son las fuentes creadas por el hombre; instalaciones industriales, automoción, calefacciones... Estas son evitables o se pueden minimizar.

Las emisiones de los vehículos, que pertenecen a las fuentes antropogénicas, son causadas por la combustión de los combustibles fósiles. Afectando al medio ambiente y a la vida social y económica de los países. En este apartado se añadirá algunos de los efectos sobre la salud humana y también medioambiental de algunas partículas.

Se va a centrar en las emisiones de las partículas que repercuten en la normativa Euro VI de los vehículos pesados con combustible diésel, que son:

- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Hidrocarburos (HC)
- Monóxido de carbono (CO)
- Material particulado (PM)

2.1.1. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son la combinación de un grupo de gases, pero entre ese grupo, estas dos sustancias son las más contaminantes; óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El componente principal más contaminante es el NO₂ del cual se hablará más detalladamente. En las zonas con aglomeración de tránsito, los automóviles llegan a producir cerca del 60% del total de óxidos de nitrógeno.

- Dióxido de nitrógeno (NO₂): se obtiene como subproducto en todas las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas cuando se oxida el óxido nítrico, en concreto en los procesos de combustión de los vehículos motorizados y las plantas eléctricas. Tiene color amarillento. Es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato que hace que se produzcan ácidos. También es un oxidante fuerte y

reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores, pudiendo atacar materiales metálicos en presencia de agua.

Sus propiedades físicas son:

- Fórmula química: NO_2
- Masa molecular: 46,01 g/mol
- Punto de ebullición: 21,2 °C
- Punto de fusión: -11,2 °C
- Densidad relativa del líquido (agua = 1g/ml): 1,45 g/ml
- Solubilidad en agua: Buena
- Temperatura crítica: 158 °C
- Presión de vapor: 96 kPa (a 20 °C)
- Densidad relativa del gas (aire = 1 g/ml): 1,58 g/ml

Los efectos dañinos sobre la salud humana y el medio ambiente son:

- Es corrosiva para la piel y las vías respiratorias, esto produce enrojecimiento y quemadura cutáneas graves.
- Si se inhala en elevadas concentraciones y en un corto periodo de tiempo, puede originar un edema pulmonar. Los efectos del edema se podrán observar pasadas unas horas y se empeora si se realiza esfuerzo físico. También afecta al sistema inmune y al pulmón.
- En el medio ambiente, ayuda al proceso de la lluvia ácida ya que se forma ácido nítrico (HNO_3) que al precipitar causa grandes destrozos en los bosques y la acidificación de las aguas superficiales.
- Óxido nítrico (NO): también llamado monóxido de nitrógeno, es un gas tóxico, incoloro y poco soluble en agua. Se forma a altas temperaturas como subproducto de la combustión en los vehículos. Las altas temperaturas permiten la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno de la atmosfera produciendo óxido nítrico (NO). En la atmósfera puede convertirse en ácido nítrico ayudando a la lluvia ácida. Si se mezcla con la radiación solar, en la parte baja de la atmósfera, ayuda a contribuir al calentamiento global y, en la parte alta, contribuye al oscurecimiento global. Los automóviles llevan catalizadores para descomponer el óxido nítrico en sus componentes originales; nitrógeno y oxígeno, con el objetivo de reducir las emisiones del NO.

Ambos, tanto el dióxido de nitrógeno y el óxido nítrico son una parte de los responsables del agujero de la capa de ozono.

También, tienen tendencia a reaccionar con otros compuestos y así originar otros contaminantes atmosféricos. Como es el caso de la niebla fotoquímica que se forma cuando reaccionan óxidos de nitrógeno con hidrocarburos en

condiciones de fuerte radiación solar. El producto final son sustancias oxidantes que tienen efectos irritantes y corrosivos.

2.1.2. Hidrocarburos

Dentro de los tipos de hidrocarburos (HC) que hay, los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH, siglas en inglés) son los conjuntos de compuestos que surgen del proceso de combustión como productos secundarios. Forman parte del combustible diésel. Químicamente son los sólidos cristalinos de color blanco-amarillento, que son insolubles en agua, pero se disuelven bien en grasas y petróleos.

A pesar de ser expulsados por la combustión de los vehículos, su foco más grande de liberarse tiene lugar de forma natural, a través de las emisiones producidas por la propia vegetación y la combustión incompleta de la madera. Sobretodo producen metano (CH_4).

Los efectos dañinos sobre la salud humana y el medio ambiente son:

- Son nocivos para las vías respiratorias.
- Pueden provocar cáncer, defectos y mutaciones en el feto si la madre se encuentra sometida a elevadas concentraciones y durante un tiempo prolongado.
- En el medio ambiente, el PAH es una sustancia orgánica persistente y de difícil degradación, por eso permanece en el ambiente durante años, afectando seriamente al medio acuático y terrestre. Se ha comprobado que estos compuestos pueden provocar cáncer y alteraciones funcionales en los animales, generándoles defectos y malformaciones genéticas.
- Pueden producir niebla fotoquímica al reaccionar con los óxidos de nitrógeno.

2.1.3. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas inodoro, incoloro, tóxico y muy inflamable. No es irritante, por lo que su exposición puede pasar completamente desapercibida. Pesa menos que el aire, por eso se acumula en la parte alta de la atmósfera. Se produce por la combustión incompleta de sustancias orgánicas como el gas, petróleo, gasolina, madera, carbón y aceites. La combustión es incompleta por la falta de oxígeno que imposibilita la oxidación completa a CO_2 .

Sus propiedades físicas son:

- Fórmula química: CO
- Masa molecular: 28,0 g/mol
- Punto de ebullición: $-191\text{ }^\circ\text{C}$
- Punto de fusión: $-205\text{ }^\circ\text{C}$
- Solubilidad en agua: 2,3 ml/100 ml (a $20\text{ }^\circ\text{C}$)

- Densidad relativa del gas: 0,97 g/ml
- Punto de inflamación: gas inflamable
- Temperatura de autoignición: 605 °C

Los efectos dañinos sobre la salud humana y el medio ambiente son:

- Si se inhala en pequeñas concentraciones puede dar lugar a confusión mental, vértigo, dolor de cabeza, náuseas, debilidad y pérdida del conocimiento. Si se inhala más continuamente, puede dañar el sistema nervioso y el sistema cardiovascular, dando lugar a alteraciones neurológicas y cardíacas.
- Es un gas venenoso altamente tóxico que puede provocar asfixia celular porque no deja que llegue oxígeno a través de la sangre. No deja porque el CO se combina con la hemoglobina de la sangre y esto impide el transporte de oxígeno a los tejidos y dificulta la respiración.
- Son más sensibles a la inhalación de CO las mujeres embarazadas y sus bebés, los niños pequeños y las personas mayores. También tiene un mayor riesgo las personas que sufren de anemia y las que tienen problemas de corazón o respiratorios.
- En el medio ambiente, puede provocar humos tóxicos e incendios si existen focos de calentamiento porque es una sustancia extremadamente inflamable y además reacciona vigorosamente con oxígeno, acetileno, cloro, flúor y óxidos nitrosos.
- Es un precursor de ozono, es decir, al combinarse con otros contaminantes atmosféricos forma el ozono troposférico. Este ozono puede provocar quemaduras importantes en el ser humano y es dañino para la flora y fauna autóctona porque está próximo a la superficie terrestre.

2.1.4. Material particulado

También llamadas partículas en suspensión o aerosoles, son las partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín (partículas de tamaño muy pequeño de carbono), partículas metálicas, cemento o polen, que están dispersas en la atmósfera y su diámetro varía entre 2,5 μ y 10 μ m. Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, por metales pesados y por material orgánico asociado a partículas de carbono (hollín). Poseen un pH básico debido a la combustión no controlada de materiales.

Los efectos dañinos sobre la salud humana y el medio ambiente son:

- Si se expone prolongadamente o repetitivamente puede provocar efectos nocivos en el sistema respiratorio de las personas porque las partículas quedan retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias superiores. También puede causar problemas cardiovasculares.

- Sometidos a largo plazo y en altas concentraciones pueden producir cáncer.
- En el medio ambiente, la mayoría de éstas partículas precipitan en la tierra, provocando una capa de polvo en la superficie que puede afectar seriamente a la salud tanto de los organismos terrestres como los organismos acuáticos.
- También producen cierto efecto invernadero.

2.2. Transporte pesado y sus emisiones

¿Cuándo se considera que un vehículo es pesado? Cuando su masa máxima técnicamente admisible está por encima de los 3500 kg. Se considera vehículo pesado a cualquier transporte que supere dicha masa y tenga motor de encendido por compresión, de gas natural o de gas licuado del petróleo (GLP).

La mayoría de camiones o autobuses, en general medios de transporte de medio y gran tonelaje, han llevado y llevan motores Diésel en vez de motores de gasolina ya que ofrecen un mayor par motor y son más resistentes, además de ser más económicos. Por eso se ha utilizado tanto en el ámbito urbano como en recorridos de media y larga distancia. Además, la fiabilidad se ha ido aumentando durante estas últimas décadas gracias al desarrollo de estos motores, que era la principal preocupación de los motores Diésel en el siglo XX.

Teniendo la fiabilidad como la primera preocupación bien cubierta. Actualmente de cara al desarrollo, se han planteado varios objetivos sostenibles como son la reducción de los gases contaminantes a la vez de reducir el coste de combustible. La razón es la obligación de desarrollar estos objetivos para cumplir las normativas Euro de emisiones.

La obligación de cumplir estas normativas en efecto de inmediato, ha hecho que muchas empresas hayan hecho grandes inversiones en I+D durante estos últimos años para adaptarse a las nuevas exigencias. Algunas de ellas han implantado motores con doble combustible para poder cumplirlas, así como reducir gastos. También muchos vehículos que llevan mucho tiempo en servicio pero que están en condiciones de funcionar varios años más, por su falta de antigüedad y la mayor durabilidad de su motor, hayan optado por remodelar e incluir sistemas de doble combustible para poder ahorrar costes de combustible y mostrar una imagen más ecológica. En los últimos años los costes de explotación han aumentado por culpa del aumento del precio de los combustibles derivados del petróleo y por eso se han buscado combustibles alternativos.

Por estas razones, aparece el gran objetivo; Implementar una alternativa realista en un vehículo nuevo o con varios años de vida en servicio que haga disminuir los gases contaminantes y los costes de explotación, que cumpla las normativas Euro, que sea económicamente asequible y que no disminuya la potencia del motor. Esta alternativa se llama Dual-Fuel, cuyo nombre es así, ya que la combustión se produce por la mezcla de

combustibles de diferentes características. Este método cumple en gran parte y además es una solución sencilla y útil.

Es conocida la importancia que tienen los autobuses y autocares en el transporte de la población, pero no tanto el grado de importancia que tienen los camiones en el transporte de mercancías. Cada día se transportan 100 kg de mercancías por persona en camiones y representan el 75% de las mercancías transportadas por tierra en Europa cada año. De ahí su gran utilización y que produzcan los transportes pesados la gran cantidad de emisiones.

El transporte en general emite el 25,4% de las emisiones totales en España. El transporte por carretera emite el 22,66% del total de las emisiones en España (89,2% son las emisiones del transporte por carretera sobre los 25,4%). Y el transporte pesado emite el 7,6% del total de las emisiones en España (33,5% son las emisiones del transporte por carretera sobre los 89,2%).

CAPÍTULO 3:

NORMATIVA EURO VI

La normativa EURO en materia de contaminación se hizo con el objetivo de poner unos límites para todos los fabricantes de vehículos. Dentro del mercado de automoción hacer un automóvil que emita menos polución significa que se tiene que invertir más en sistemas como la inyección, la utilización de nuevos materiales, y de componentes que reduzcan las emisiones como los catalizadores y los filtros entre otros. Por esta razón, se utiliza la legislación, para que se fabriquen vehículos menos contaminantes y todos estén en igualdad de condiciones dentro del mercado.

La Euro VI que pertenece a las llamadas normas Euro (normativa europea sobre emisiones), está creada desde la Directiva 70/220/CEE de la Unión Europea con el fin de crear los estándares de emisiones europeos en transporte terrestre. Es de obligado cumplimiento en todos los países de la unión europea. La normativa estipula unos límites de emisiones para los diferentes gases de combustión de los automóviles con motor Diésel que sean vehículos nuevos y vendidos dentro de los estados miembros de la Unión Europea. Estas normativas no son aplicables a los vehículos que ya están en circulación antes de implementar la normativa.

La primera normativa Euro entró en vigor en el año 1993 que fue llamada Euro 1 y desde entonces cada varios años han ido renovando las normativas llamándolas Euro 2, Euro 3... Hasta que el año 2015 se creó la Euro 6. Para vehículos ligeros se escriben las normativas con números arábigos (Euro 1, Euro 2, etc...), en cambio para vehículos pesados se denomina con números romanos (Euro I, Euro II, etc...). La Euro 6 es la normativa más restrictiva que habido hasta ahora en la materia de la contaminación.

Para vehículos pesados se aplica la normativa a todos los vehículos de motor con una tasa máxima en carga técnicamente admisible de más de

3500 kg, que estén equipados con motores de encendido por compresión o de gas natural encendido por chispa o motores de GLP.

Las normativas Euro con sus directivas son estas:

- Euro I: en 1993, se aplicó para turismos con la directiva 91/441/CEE y también para turismos y para camiones ligeros con la directiva 93/59/CEE.
- Euro II: en 1996, se aplicó para turismos con la directiva 94/12/CE y 96/69/CE.
- Euro III: en 2000, se aplicó para cualquier vehículo con la directiva 98/69/CE.
- Euro IV: en 2005, se aplicó para cualquier vehículo con la directiva 98/69/CE y 2002/80/CE.
- Euro V: en 2008/09, se aplicó para cualquier vehículo con la directiva 715/200/CE.
- Euro VI: en 2014, se ha aplicado para cualquier vehículo con la directiva 459/2012/EC.

En cada normativa se ha obligado a las empresas a desarrollar sistemas o avances técnicos que sean capaces de cumplir cada normativa. Drásticamente se han bajado las emisiones de escape desde la Euro I. En 15 años, en los camiones se ha reducido sus emisiones de forma espectacular:

- Un 98% para los óxidos de nitrógeno (NOx)
- Un 95% para los hidrocarburos (HC)
- Un 89% para el monóxido de carbono (CO)
- Un 97% para el material particulado (PM)

En la figura 2 se puede ver un ejemplo de la evolución de los límites de NOx y partículas, y como se han ido reduciendo:

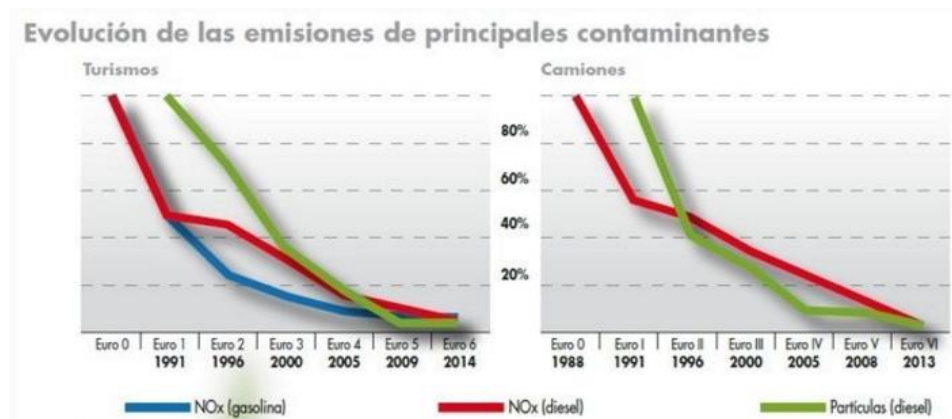


Figura 2. Evolución de las emisiones de principales contaminantes.

La normativa Euro VI entro en vigor el 6 de diciembre del 2013 en el caso de los camiones y autobuses. Esta normativa regula y controla las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM) de todos los vehículos terrestres (se excluyen vehículos no terrestres como los barcos de navegación marítima y los aviones). Cada tipo de vehículo tiene una normativa diferente sobre emisiones. El cumplimiento de estas normas se controla mediante el funcionamiento del motor en un ciclo de ensayos los cuales están normalizados. Estos ciclos de ensayos han de reflejar situaciones de conducción normales.

Como se puede comprobar, no se habla en esta normativa de las emisiones de CO₂, estas emisiones se regulan mediante la regulación 443/2009 realizada por la comisión europea.

Para poner los límites en las normas, en los turismos se definen en g/km y en los camiones se definen según la potencia del motor en g/kWh, por eso no se puede comparar. Debajo se puede ver una tabla resumida sobre las emisiones desde la Euro I a la Euro VI para motores Diésel de camiones y autobuses en g/kWh:

Tabla 3. Emisiones desde la Euro I a Euro VI en g/kWh.

Tipo	Fecha	Ciclo de ensayos	CO	HC	NOx	PM	Humo
Euro I	1992, <85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	-
	1992, >85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	-
Euro II	Oct. 1996	ECE R-49	4.0	1.1	7.0	0.25	-
	Oct. 1998		4.0	1.1	7.0	0.15	-
Euro III	Oct. 1999 Sólo EEVs	ESC & ELR	1.0	0.25	2.0	0.02	0.15
	Oct. 2000	ESC & ELR	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8
Euro IV	Oct. 2005	ESC & ELR	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	Oct. 2008	ESC & ELR	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Euro VI	Dic. 2013	WHSC	1.5	0.13	0.4	0.01	-

En la figura 3 se han hecho unas gráficas a partir de la tabla para poder ver mejor la reducción de cada componente en cada nueva normativa Euro:

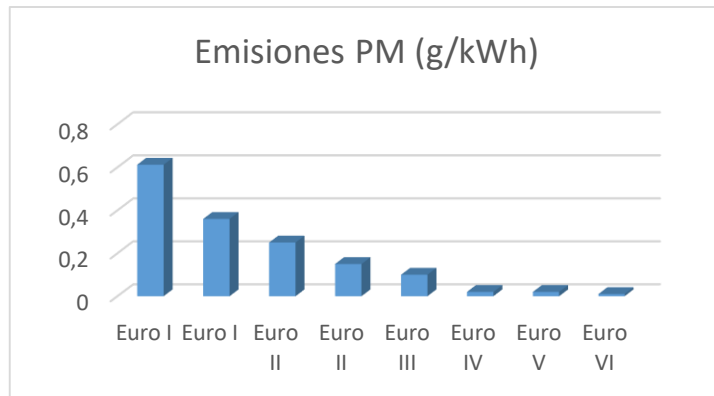
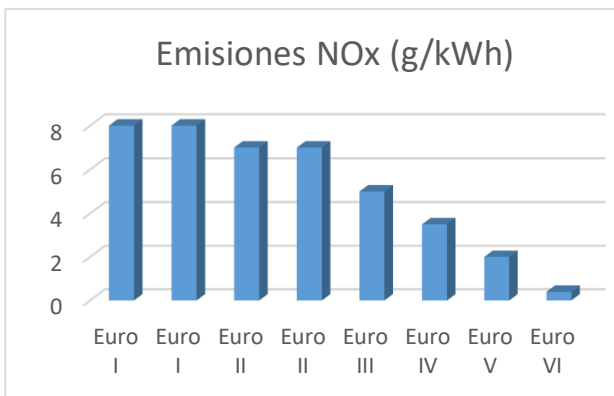
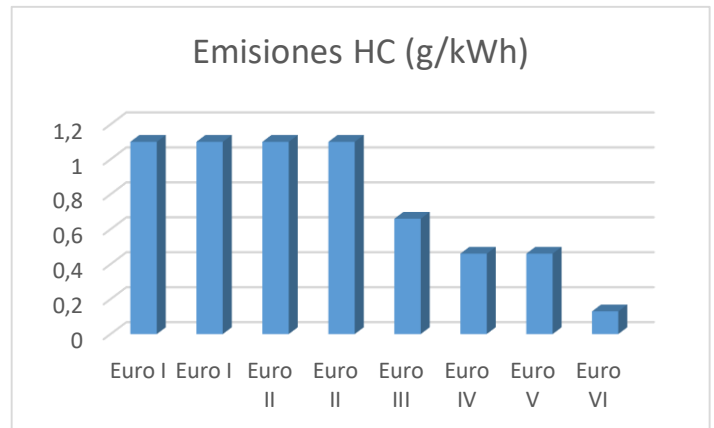
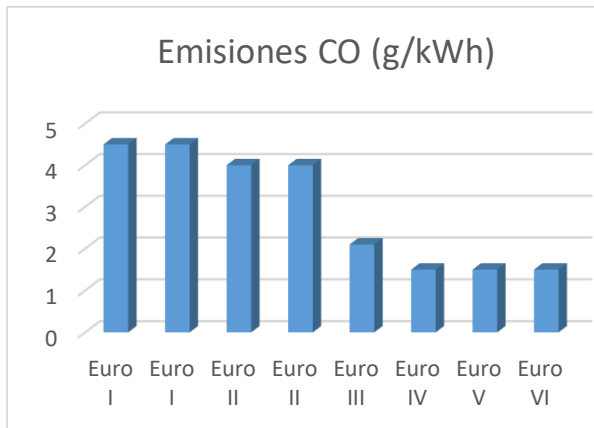


Figura 3. Gráficas generadas a partir de la tabla 3.

CAPÍTULO 4:

PRECURSOR

EDUARDO

BARREIROS

En España existe una referencia histórica muy importante acerca de la transformación o remodelación de motores.

Eduardo Barreiros nació en el año 1919 en la pequeña localidad de *Gundiás* situada muy cerca de *Ourense (Galicia)*. Fue uno de los empresarios más importantes e influyentes en los llamados "años del desarrollo" que fueron los años de la postguerra. A partir de una pequeña empresa familiar de su padre sobre autobuses, consiguió levantar uno de los complejos industriales sobre la motorización más importante que ha habido en España gracias a su agudo ingenio y un instinto innegable para ver las oportunidades de negocio. La gran mayoría de sus avances y desarrollos fueron sobre los transportes pesados, ya que trabajó en la fabricación de autobuses, camiones, maquinaria de construcción y maquinaria agrícola.

También destaca por ser un gran empresario, llegó a fundar once empresas: Becosa (Barreiros Empresa Constructora, S.A.), Barreiros Diésel, Cabsa (Compañía Anónima de Bombas, S.A.), Ceesa (Constructora Eléctrica Española, S.A.), Mosa (El motor nacional, S.A.), Tempo Onieva (Participa en esta empresa con un tercio del capital social), Barreiros AEC, S.A. (Es una fundación con un 75% de la empresa Barreiros y un 25% de la empresa AEC), Barreiros Chrysler (Barreiros Diésel cede el 40% de sus acciones a

Chrysler Corporation), Cipsa (Centro de investigaciones Petrolíferas, S.A.), Dimisa (Diésel Motores Industrias, S.A.) y Taino EB.

No se ha especificado las cantidades de empresas que llego a comprar ni las grandes ampliaciones de sus empresas.

A parte de su destacada historia en el desarrollo de la automoción, se destaca en este trabajo ya que fue el primer español en transformar un motor de gasolina a Diésel para un camión. Fue en los años 40 y lo hizo para solventar el problema del alto precio de la gasolina que era prácticamente impagable para los clientes de la época. Con el diésel los usuarios encontraban un combustible más barato y además tenía un menor consumo. Él fue uno de los precursores que abrió la posibilidad de poder transformar cualquier tipo de motor como es el caso que se está estudiando de transformar un motor Diésel a Dual-Fuel.

También fue uno de los precursores en la creación de unas máquinas llamadas gasógenos, debido a la escasez que había en la posguerra de gasolina y combustibles. Estos aparatos obtenían un combustible gaseoso a partir de la combustión de madera o carbón en una caldera, el procedimiento se llama gasificación. Cuando se quemaba los productos, estos generaban monóxido de carbono que tiene un pequeño de poder calorífico, pero a la vez es muy venenoso. Se acoplaban a camiones y tractores para que pudieran funcionar compensando la enorme falta de combustible.

Después de su fallecimiento, en el año 1997 se constituye en Madrid "La Fundación Eduardo Barreiros", en homenaje a su figura y preservar su legado ayudando a la formación de los más jóvenes que fue una constante de la vida de Barreiros.

En el año 1998 se inauguró el Museo Eduardo Barreiros, en Valdemorillo (Madrid), es un museo monográfico de titularidad privada, donde se puede conocer la vida y obra que logró crear una de las empresas privadas más importantes en los años 1950 y 1960.



Imagen 1. Autobús de la empresa familiar en 1932 y de Eduardo Barreiros

CAPÍTULO 5: FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DIÉSEL

5.1. Motor térmico

Son los motores que transforman la energía calorífica en energía mecánica para producir trabajo. Normalmente, esta energía calorífica es obtenida de la combustión de combustibles líquidos y gaseosos. Para transformarla en energía mecánica se utiliza mecanismos que la transforman a partir de un movimiento alternativo, en un movimiento rotativo o de un empuje realizado por un chorro a gas.

Dentro de la combustión, el fluido que se utiliza es llamado fluido operante porque está mezclado por un combustible y por un comburente. El combustible normalmente es gasolina o gasoil y el comburente es el aire atmosférico que suministra el oxígeno de la combustión.

Los elementos de la combustión son el aire + gasoil + ignición = energía.

En cuanto al principio de funcionamiento los motores térmicos se clasifican en:

- Alternativos

- Rotativos
- De chorro

También se clasifican según donde se produzca la combustión:

- Combustión externa
- Combustión interna

Los motores de los transportes pesados son motores alternativos y de combustión interna (MCI). Dentro de los motores alternativos hay los siguientes motores:

- Con ciclo Otto o de encendido por chispa.
- Con ciclo Diésel o de encendido por compresión.

Los transportes pesados llevan motores ciclo Diésel.

5.2. Elementos y distribución motor Diésel

Es un motor térmico alternativo con combustión interna donde el autoencendido se consigue por la alta temperatura que se produce al comprimir el aire.

Este motor fue inventado por Rudolf Diesel en el año 1892, de su apellido deriva el nombre del motor. Pero se comenzaron a desarrollar estos motores a principios del siglo XX y fue en el año 1923 cuando la empresa MAN utilizó por primera vez este motor en uno de sus camiones.

Las partes más importantes del motor Diésel son:

- Camisa o cilindro: es donde el pistón se mueve con movimientos rectilíneos alternativos. Tiene forma de cilindro y suelen ser de hierro fundido.



Figura 4. Camisa o cilindro.

- Culata: es la parte superior que cierra todos los cilindros. Cuando se comprime el aire, este se comprime entre la culata y el pistón. Están hechas de fundición de hierro o aluminio. Es un soporte para otros elementos del motor como las válvulas, balancines e inyectores.

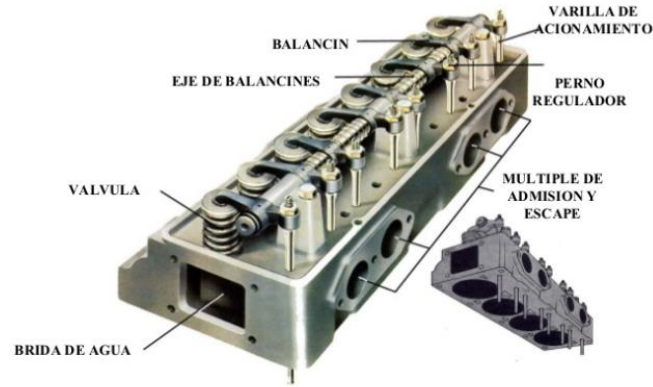


Figura 5. Culata.

- Pistón: es un embolo cilíndrico de aluminio que asciende y desciende en el interior de la camisa. Transmite el empuje de la combustión a través de la biela al cigüeñal.



Figura 6. Pistón.

- Perno o bulón: sujeta el pistón al pie de la biela.



Figura 7. Perno o bulón.

- Biela: es una parte del mecanismo de biela-manivela que conecta el pistón mediante el perno, al cigüeñal que sería la manivela, transmitiendo la fuerza de uno al otro.



Figura 8. Biela.

- Cigüeñal: es la otra parte del mecanismo llamado biela-manivela que transforma el movimiento lineal alternativo (en este caso del perno que está situado en el pistón) en circular uniforme. El cigüeñal es como una serie de pequeñas manivelas, una por cada pistón.

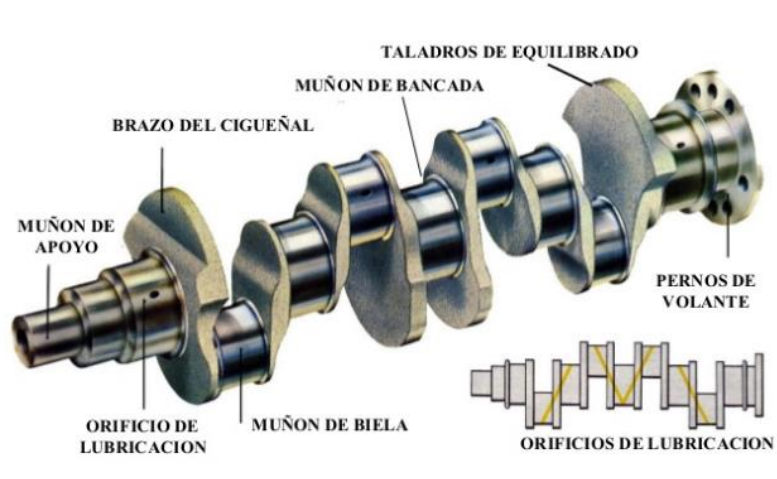


Figura 9. Cigüeñal.

- Válvulas de admisión y escape: el árbol de levas las acciona. Estas válvulas permiten el paso del aire hacia dentro y fuera del cilindro.



Figura 10. Válvulas de admisión y escape.

- Árbol de levas: se utiliza para abrir o cerrar las válvulas. Ha de ir sincronizado con la distribución del motor. Es decir, con el movimiento del cigüeñal.



Figura 11. Árbol de levas.

- Cámara de combustión: es el volumen comprendido entre la culata y la cabeza del pistón.
- PMS: Punto Muerto Superior
- PMI: Punto Muerto Inferior
- Volumen total del cilindro (V_1): es el espacio entre la culata y cuando el pistón está en la posición PMI.
- Volumen de la cámara de compresión (V_2): es el espacio entre la culata cuando el pistón está en la posición PMS.
- Cilindrada ($V_1 - V_2$): la diferencia entre la V_1 y V_2 . Es el volumen entre el PMS y el PMI.
- Carrera: distancia entre el PMS y el PMI.
- Colectores de admisión y escape: son los conductos por donde entra y sale el aire. La cantidad de aire no tiene regulación.
- Calibre: es el diámetro interior del cilindro en milímetros.

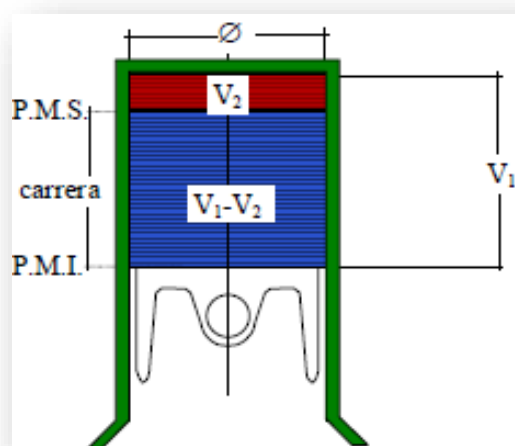


Figura 12. Cámara de combustión.

- Inyector: por donde entra el combustible al cilindro, se regula mediante la bomba de inyección.



Figura 13. Inyector.

- Relación de compresión: es la relación que hay entre V1 y V2. Se representa por ρ y se calcula:

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

En la figura 14 se muestra una imagen de conjunto de un motor Diésel para mostrar donde están situados los componentes más importantes:

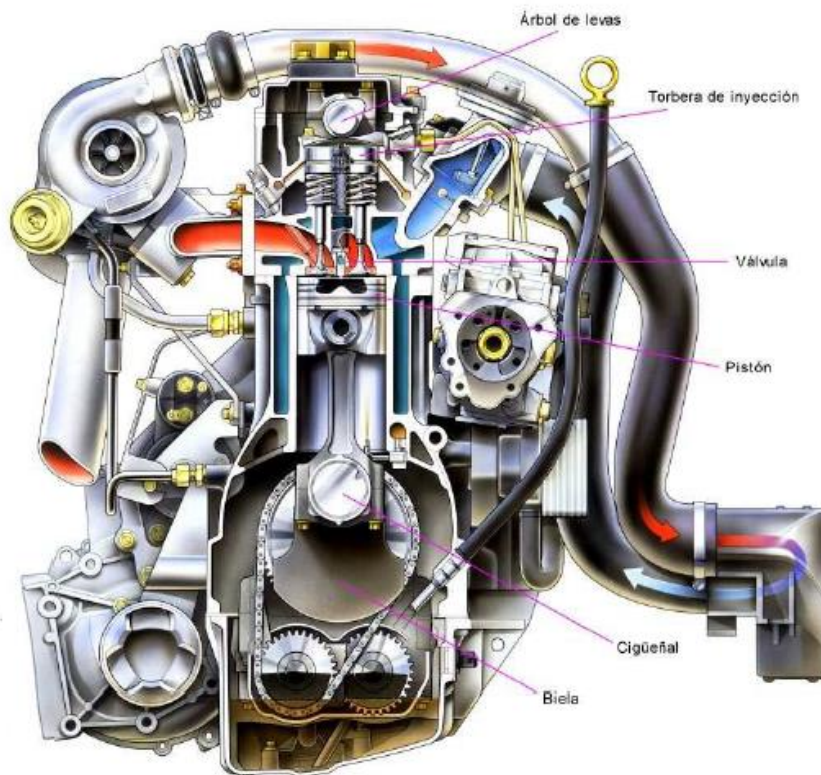
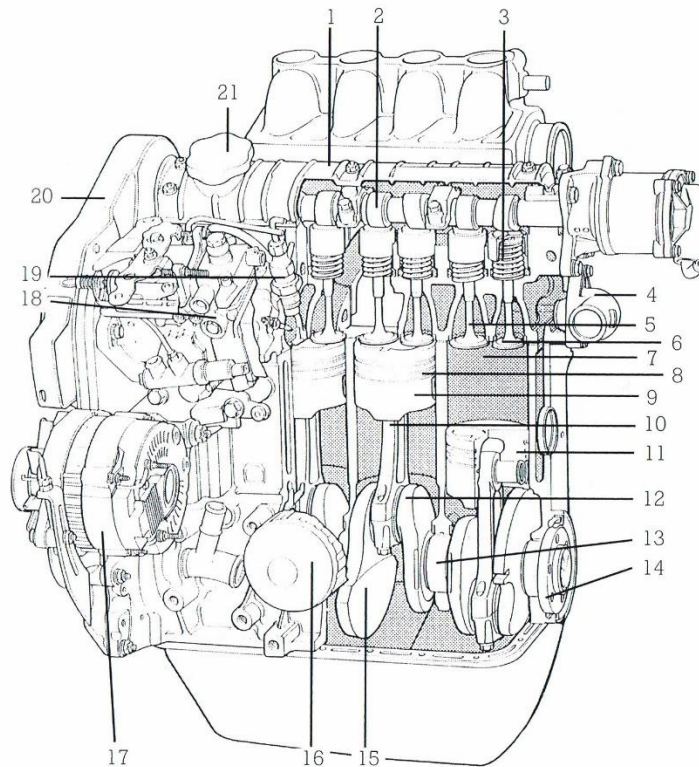


Figura 14. Sección motor Diésel.



Motor diésel de cuatro cilindros con árbol de levas en cabeza

1 Tapa de balancines. 2 Árbol de levas. 3 Resorte de válvula. 4 Entrada de agua de refrigeración. 5 Válvula de admisión. 6 Válvula de escape. 7 Cilindro. 8 Aros del pistón. 9 Pistón. 10 Biela. 11 Espiga del pistón. 12. Cigüeñal. 13 Cojinete principal. 14 Acoplamiento del volante. 15 Contrapeso. 16. Filtro de aceite. 17 Alternador. 18. Bomba de inyección de combustible. 19 Inyector. 20. Accionamiento del árbol de levas. 21. Tapón de aceite.

Figura 15. Sección motor Diésel de cuatro cilindros.

Doble árbol de levas en cabeza significa que utiliza dos árboles de levas en la culata. Uno para las válvulas de admisión y otro para las de escape.

5.3. Funcionamiento motor Diésel

El motor Diésel en los transportes pesados es de cuatro tiempos. El pistón que está dentro del cilindro desarrolla cuatro carreras alternativas o desplazamientos y el cigüeñal gira durante esas cuatro carreras, un total de 720° (2 giros), cada tiempo el cigüeñal gira 180°. Ahora se explicará brevemente cuales son estos cuatro tiempos, los cuales el llenado y vaciado de los gases se realiza a través de dos válvulas situadas en la culata. Estas dos válvulas se abren y se cierran a partir del movimiento del árbol de levas cuyo sistema de distribución está sincronizado con el cigüeñal.

El funcionamiento de los cuatro tiempos es el siguiente:

- Admisión (Primer tiempo): se abre la válvula de admisión que permanece abierta mientras el pistón se desplaza desde el punto PMS al

PMI y debido a la depresión o vacío interno que crea el pistón al desplazarse, el aire fluye desde el colector de admisión al cilindro. Cuando llega el pistón al PMI, la válvula de admisión se cierra.

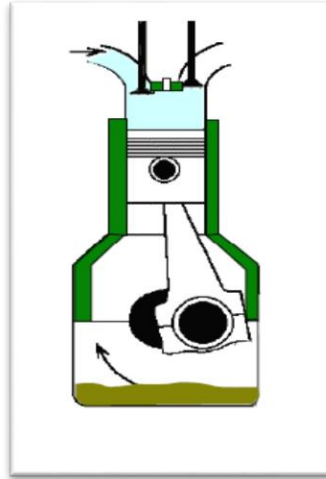


Figura 16. Primer tiempo: admisión.

- Compresión (Segundo tiempo): las dos válvulas están cerradas mientras el pistón vuelve a subir al punto PMS y así se completa la primera vuelta del árbol motor. Esta etapa se llama compresión por que el pistón al subir comprime el aire a gran presión y este se queda alojado en la cámara de combustión. Al conseguir una gran presión, del orden de 50 at, el aire sube su temperatura a más de 600 °C que es superior al punto de inflamación del combustible y por eso no se necesita la chispa eléctrica para que se auto inflame el combustible cuando se inyecta (El punto de inflamación es entre 37,78 °C y 60 °C).



Figura 17. Segundo tiempo: compresión.

- Trabajo (Tercer tiempo): el pistón está situado en el punto de PMS que es justo cuando acaba la compresión. En ese momento se inyecta el combustible en el interior de la cámara de combustión. El problema es que dentro tiene una gran presión y para poder inyectar el combustible se ha de realizar a una alta presión, entre 150 y 300 at y se introduce de forma pulverizada. Se pulveriza para que haya el mayor número de gotas posible y así presente mayor superficie de contacto con el aire. Como la temperatura del aire es superior al punto de inflamación del combustible, éste se inflama en cuanto entra en contacto con el aire, produciendo la combustión. Esto produce que se eleve la temperatura interna y la presión, mientras dura la inyección, se supone constante. Seguidamente, se realiza la expansión haciendo que el pistón baje hasta PMI. Justo antes de que llegué al PMI se abre la válvula de escape para que haya presión atmosférica. Así se pierde potencia del motor porque pierde calor, pero se facilita el escape de los gases.

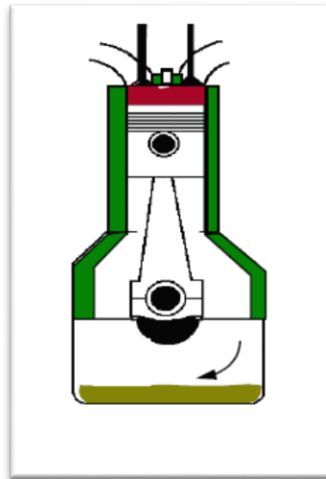


Figura 18. Tercer tiempo: trabajo.

- Escape (Cuarto tiempo): el pistón empieza a volver a subir hacia el PMS con la válvula de escape abierta. Nada más que se abra, los gases empiezan a salir ya que están a elevada presión dentro del cilindro. Cuando está ascendiendo el pistón, este expulsa a la atmósfera los gases restantes. En este tiempo, en los motores Diésel se produce el llamado cruce de válvulas, que consiste en la apertura de la válvula de admisión mientras se están expulsando los gases por la válvula de escape, para que el gas nuevo entrante ayude a expulsar el gas viejo. Así solo habrá aire limpio en el primer tiempo y es útil para el buen mantenimiento del sistema. El árbol motor habrá completado dos vueltas que corresponde al ciclo completo de trabajo.

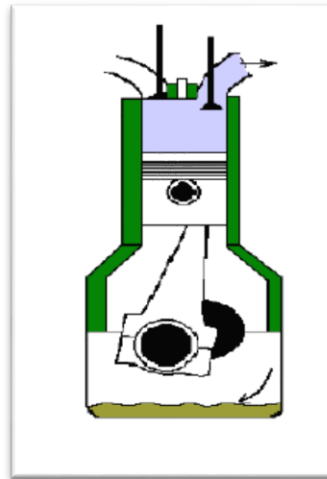


Figura 19. Cuarto tiempo: escape.

5.4. Descripción ciclo Diésel

Desde un punto de vista termodinámico, los motores Diésel cumplen teóricamente un ciclo Diésel. El ciclo teórico se muestra en la figura 20, donde se aprecian detalladamente las fases a partir de los puntos de la figura:

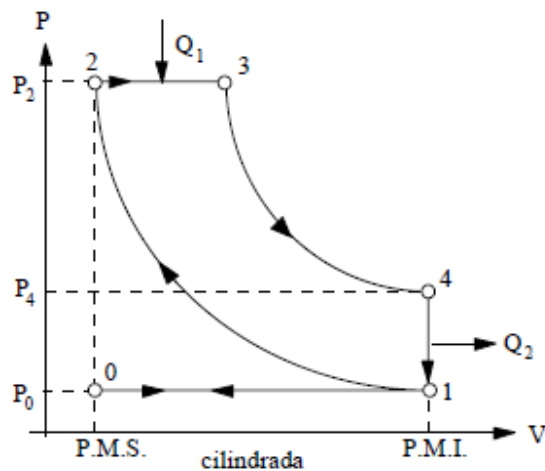


Figura 20. Representación ciclo Diésel.

- 0-1. Admisión (Isóbara): el cilindro se llena de aire, suponiendo que no hay rozamientos por los conductos de admisión. Por eso, se considera que la presión es la atmosférica y se mantiene constante, por tanto, se puede considerar al proceso como una transformación isóbara.
- 1-2. Compresión (Adiabática): el aire es comprimido en la cámara de combustión donde alcanza una gran presión. Por la alta velocidad en el

proceso, se supone que no hay pérdidas de calor, y este proceso se llama compresión adiabática.

- 2-3. Inyección y combustión (Isóbara): durante el tiempo de inyección, el pistón está arriba y aunque empieza a bajar, se supone que la presión del interior del cilindro se mantiene constante y por eso también se llama transformación isóbara. El combustible que entra se va quemando a medida que va introduciéndose en el cilindro, para así compensar el aumento de volumen que se genera al descender el pistón. Esto se conoce como retraso de combustión.
- 3-4. Expansión (Adiabática): la expansión se produce cuando termina la inyección y, al igual que la compresión, esta también es una transformación adiabática por que no se produce intercambio de calor con el medio exterior. También al ser el proceso al revés, se reduce la presión a medida que el cilindro aumenta de volumen.
- 4-1. Primera fase del escape (Isócora): Isócora quiere decir que el volumen es constante. Se considera esto ya que poco antes de que el pistón esté en el PMI, la válvula se abre rápidamente permitiendo que los gases quemados se escapen al exterior, haciendo que llegue a ser la presión atmosférica en el cilindro y perdiendo una cantidad de calor, no transformado, en trabajo al exterior. Todo se considera a partir que el pistón no se mueve en el punto PMI.
- 1-0. Segunda fase del escape (Isóbara): el pistón al ir subiendo al punto PMS, expulsa los gases residuales que han quedado en el interior del cilindro. Por la misma razón que en la admisión se considera que la transformación es isóbara, ya que es el mismo proceso, pero ahora es la expulsión de los gases a presión atmosférica. Por defecto, se considera que la presión es la atmosférica y se mantiene constante.

5.5. Rendimiento térmico de los motores Diésel

El rendimiento térmico expresa el mayor o menor grado de aprovechamiento de la energía del combustible que hace un motor.

Se puede calcular el calor introducido mediante la variación de entalpía del fluido operante considerándolo como un gas perfecto porque es una transformación a presión constante. Los números de las fórmulas tiene en cuenta la numeración de la figura 20 y en este caso es el calor introducido durante el proceso de inyección y combustión. Se calcula:

$$Q_1 = C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (2)$$

Por la misma razón, pero en este caso es a volumen constante, se puede calcular la sustracción o pérdida del calor durante el proceso de la primera fase de escape, como:

$$Q_2 = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (3)$$

El rendimiento térmico ideal para un ciclo Diésel es:

$$\eta_t = \frac{\text{Calor suministrado} - \text{calor sustraído}}{\text{Calor suministrado}} = \frac{C_p \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_p \cdot (T_3 - T_2)} \quad (4)$$

Haciendo varios cálculos, el rendimiento térmico ideal es:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\rho^{\gamma-1}} \cdot \frac{\tau^{\gamma}-1}{\tau-1} \quad (5)$$

Donde $\tau = \frac{V_3}{V_2}$, $\rho = \frac{V_1}{V_2}$, γ = la relación entre los calores específicos.

Por tanto, se puede deducir que el rendimiento térmico de los motores Diésel son función; de la relación de compresión, de la relación de combustión a presión constante y de la relación entre los calores específicos.

5.6. Combustible diésel

El origen tanto del diésel como de la gasolina es el petróleo. El petróleo, contiene una gran cantidad de compuestos orgánicos entremezclados. Entre estos compuestos hay todo tipos de hidrocarburos, entre ellos unos llamados alifáticos que están compuestos por hidrógeno y carbono. Estos dos componentes (hidrógeno y carbono) son los primordiales de los microorganismos y plantas, y por eso se piensa que el petróleo tiene este origen. Alguno de los componentes que se pueden encontrar en el petróleo son:

- Hidrocarburos como metano (CH₄) y derivados del propano (C₃H₆), ciclohexano (C₆H₁₂) y benceno (C₆H₆).
- Restos del craqueo.
- Sulfuros orgánicos.
- Compuestos de nitrógeno y oxígeno.
- Pequeños restos de metales como hierro, plomo, sodio o níquel.

De cara a poder separar todos estos componentes, el petróleo se calienta en refinerías para evaporar las moléculas. Primero se evaporan las más sencillas y luego las más pesadas y complejas. Entre los componentes evaporados están los de la gasolina que se evaporan por debajo de la temperatura de ebullición del agua (100 °C). Los del diésel, que tienen entre doce y quince carbonos, se evaporan superando esta temperatura (entre 250 °C y 350 °C a presión atmosférica) o los del alquitrán que se necesita más temperatura para evaporarlos.

También se puede obtener diésel, pero en este caso en una composición muy similar a partir de aceites vegetales, este tipo de diésel es conocido como biodiésel. Se obtiene a partir de la transesterificación de triglicéridos (aceite) que consiste en combinar el aceite vegetal con un alcohol ligero como el metanol. Tiene la ventaja de no contaminar el medioambiente.

El diésel es un hidrocarburo en estado líquido de color verdoso que se utiliza principalmente como combustible para motores Diésel y en calefacción. Algunas propiedades generales más importantes son:

- Densidad: 832 kg/m³
- Poder calorífico: 43,1 MJ/kg
- Densidad volumétrica energética: 35,86 MJ/L
- Emisiones de CO₂: 73,25 g/MJ
- Color: Azul o verdoso
- Viscosidad: 5,5 cSt a 37,8 °C
- Punto de inflamación: 60 °C

Las propiedades físico-químicas más relevantes, son:

- Número de cetano: es un número para cuantificar la rapidez de la ignición seguida de un quemado total a medida que va entrando en contacto con el aire. Cuanto más alto este valor en el combustible, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de la combustión.
- Viscosidad: cuanta menos viscosidad del diésel más fácil es la pulverización del combustible, aunque si es demasiado baja no se consigue la lubricidad adecuada en la bomba de inyección.

La fórmula química general del gasóleo o diésel es C₁₂H₂₃ y su composición es de:

- 75% de hidrocarburos saturados (Principalmente parafinas).
- 25% de hidrocarburos aromáticos.

Del cual 86,1% de la composición del diésel es carbono.

Hay tres tipos de gasóleo o diésel:

- Gasóleo A: es el utilizado para los automóviles.
- Gasóleo B: se utiliza para usos agrícolas e industriales.
- Gasóleo C: se utiliza para calefacción doméstica, agua caliente y para uso industrial.

5.7. Diferencias entre combustible diésel y gasolina

El combustible diésel se evapora mucho más lento que la gasolina porque tiene mayor número de carbonos, por eso es más pesado y tiene mayor densidad (un 12% más). Gracias a que tiene un mejor proceso de combustión (ciclo termodinámico más eficiente), el diésel es un 30% más

eficiente que la gasolina, pero se necesita un 25% más de petróleo para poder crear la misma cantidad de diésel y de gasolina. Los poderes caloríficos de ambos son similares pero el diésel al tener mayor densidad permite obtener un 18% mayor de potencia energética por unidad de volumen que sumado a su eficiencia, se puede concluir que el rendimiento en el diésel es mayor. Al ser más eficiente, en una misma distancia, un motor Diésel consumirá menos combustible que un motor de gasolina. De ahí son varias razones del porque los camiones utilizan el combustible diésel en vez de la gasolina, excepto en Estados Unidos.

Algunas diferencias específicas de ambos:

Tabla 4. Diferencias específicas entre gasolina y diésel.

Diésel	OTTO (Gasolina)
Tiene más Par/RPM	Mejor relación Peso/Potencia
Produce más suciedad	Buen Par/RPM solo a regímenes de giros altos
Hace más ruido	Más limpio

En los aspectos medioambientales, la gasolina produce una mayor cantidad de dióxido de carbono (CO₂) porque necesita quemar más cantidad para obtener el mismo resultado que con el diésel y por eso afecta más al efecto invernadero. En cambio, el diésel afecta en la lluvia ácida y afecta más sobre la salud por que produce más cantidad de óxidos de nitrógeno y hollín. El hollín son partículas sólidas que son los responsables del humo negro que desprenden los tubos de escape.

5.8. Ventajas y desventajas del motor Diésel respecto el motor Otto

Se resumen las ventajas y desventajas del motor Diésel respecto al motor Otto:

- Ventajas:
 - Mayor rendimiento térmico con mayor potencia útil.
 - Menor consumo de combustible, aproximadamente un 30% menor.
 - Un combustible más económico.
 - Menor contaminación atmosférica.
 - No existe peligro de incendio por no usar combustible vaporizado.
 - Motor más robusto y más apto para trabajos duros, con una mayor duración de uso.

- Mayor rentabilidad.
- Mayor par motor.
- Desventajas:
 - Mayor peso del motor.
 - Necesita soportes más fuertes.
 - Elementos de suspensión de mayor capacidad.
 - Coste más elevado del motor.
 - Menor régimen de revoluciones y menor potencia.
 - Motor más ruidoso, más sucio y con mayores vibraciones.
 - Reparaciones más costosas.
 - Arranque más difícil y lento sobretodo en invierno por el frío.
 - Requieren mayor calidad en los aceites de engrase.

En los motores Diésel necesita estar formado por elementos muy resistentes que soporten grandes cargas porque en la compresión han de soportar presiones de trabajo muy elevadas. De ahí su mayor peso y que sean sus elementos más lentos en sus movimientos.

Los motores Diésel consumen menos que un motor Otto de la misma potencia por tener una mayor relación de compresión. Ya que, a mayor relación de compresión, mayor es el rendimiento térmico y se aprovecha más la energía calorífica del combustible.

Por último, actualmente los fabricantes de motores Diésel de nueva tecnología y fabricación se centran en buscar y desarrollar:

- Una velocidad de régimen superior.
- Reducir el coste de fabricación.
- Utilizar un combustible con el menor consumo posible y su menor precio.

CAPÍTULO 6:

SISTEMA DUAL-FUEL

El sistema Dual-Fuel es un sistema que aprovecha la mezcla de dos combustibles. Estos dos combustibles son el diésel y un Gas Natural Vehicular (GNV).

Los motores con este sistema son motores originales Diésel sin haber cambiado sus componentes, ni su arquitectura básica, ni la combustión que se realiza. Pero que se le añade una serie de componentes para poder inyectar el GNV dentro de los cilindros del motor. Al añadir dicho gas se mantiene los parámetros del motor original de la temperatura y la presión máxima producida dentro del cilindro se reduce. El Gas Natural Vehicular puede estar almacenado en estado gaseoso o en estado líquido.

Actualmente existen, empresas que comercializan automóviles en serie con este sistema y empresas que se dedican a la transformación de motores Diésel originales al sistema Dual-Fuel. Muchas empresas de transporte pesado se ven obligadas a reformar sus motores al sistema Dual-Fuel por exigencias de los clientes o para tener una reducción en sus gastos de combustible.

En Europa actualmente no está permitida la adquisición de nuevos autobuses con motores de ciclo Diésel, pero se posee un importante parque de unidades con motor Diésel todavía en stock, siendo la transformación a Dual-Fuel una solución económica y efectiva.

El sistema Dual-Fuel está dividido en dos tipos dependiendo del tipo de Gas Natural Vehicular que tengan almacenado en el depósito; Gas Natural Comprimido (GNC) y Gas Natural licuado (GNL). Ambos sistemas tienen un modelo de elementos entre el depósito y el motor. A continuación, se detallarán las características de estos dos tipos de Gas Natural Vehicular.

Algunas de las ventajas que se puede encontrar:

- Los beneficios que tiene la utilización del GNV respecto a otros combustibles tanto ambientales como económicos y acústicos.
- Una inversión rentable a medio plazo.
- El cumplimiento de la normativa europea EURO VI.
- Mejor mantenimiento y fiabilidad de los motores.
- La mezcla de combustibles que aporta la misma potencia y calidad que si fuera solo con diésel.

También tiene desventajas pudiendo destacar:

- Por el peso y la robustez de la instalación no es recomendable la utilización en vehículos ligeros, pero si en vehículos pesados.
- La utilización de un combustible fósil, pero con una gran reserva de gas.
- El alto coste en la inversión de las estaciones y equipos de servicio de gas natural.
- Tiene mayor peligrosidad que el sistema Diésel.

6.1. Gas Natural Vehicular (GNV)

El Gas Natural Vehicular es un combustible automotor que puede sustituir totalmente a la gasolina en motores de combustión interna por encendido de chispa (motores Otto) y puede sustituir parcialmente al combustible diésel en los motores de encendido por compresión (motores Diésel). Es el mismo gas natural que se emplea en la calefacción o producción de agua caliente, pero se suministra en unas condiciones especiales de presión y temperatura para que puedan ser utilizados en vehículos.

Como su nombre indica es el gas natural aplicado a cualquier tipo de vehículo, tanto vehículos de poco peso como los vehículos ligeros o turismos a vehículos con gran carga como son camiones, furgonetas, autocares e incluso ferrocarriles, aviones y barcos. Estos vehículos se pueden conseguir directos de fábrica o a través de la instalación o modificación del vehículo convencional como es el caso que se ocupa.

El término de Gas Natural Vehicular hace referencia a estos dos tipos suministros:

- Gas natural comprimido (GNC): es gas almacenado en un depósito cilíndrico especial del vehículo a una presión de 200 bares.
- Gas natural líquido (GNL): es gas almacenado en estado líquido a muy baja temperatura también en un depósito cilíndrico especial. Este gas se utiliza en vehículos de largo recorrido ya que triplica la autonomía del vehículo (en torno a 1000 km). Por eso se utiliza en transporte de mercancías de largo recorrido, en barcos, en locomotoras, etc.

Se buscó utilizar este combustible porque resuelve los inconvenientes económicos, medioambientales y acústicos del petróleo. Por ejemplo, de cara a mejorar la calidad del aire, reduce las emisiones de:

- Reduce hasta un 85% las emisiones de óxidos de nitrógeno.
- Reduce casi el 100% de las partículas en suspensión.
- Reduce un 20% las emisiones de CO₂.

También reduce un 50% de emisión sonora comparado con los motores Diésel.

Uno de los inconvenientes es que es un combustible fósil y, por tanto, al igual que el diésel o gasolina tienen unas reservas limitadas. Pero en este caso el margen es mucho más amplio ya que hay reserva de gas natural para unos 250 años según la Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).

Otro inconveniente es el problema de la seguridad del gas natural al ser un gas extremadamente inflamable. Por eso se ha desarrollado un mecanismo para poder transportar el gas natural como carburante con un elevado nivel de seguridad gracias al alto nivel de las normativas. En cambio, tiene la ventaja que al ser un gas menos denso que el aire, a diferencia de los combustibles líquidos o licuados del petróleo, no tiene tendencia a acumularse en espacios o huecos de vehículos o recintos, permitiendo su disolución rápidamente.

6.1.1. *Beneficios de la instalación del GNV*

Los beneficios o ventajas que se encuentran al instalar el GNV a un vehículo convencional son estos:

- Ahorro respecto a otros combustibles.
- Hay una reducción en los costes de mantenimiento por tratarse de un sistema de combustión más limpio.
- Contribuye al cuidado del medio ambiente porque reduce el efecto del calentamiento global y mejora la calidad del aire de la ciudad gracias a la reducción de la emisión de gases contaminantes como: monóxido de carbono, material en partículas, óxido de nitrógeno y dióxido de carbono. Todo en comparación a la emisión con gasolina y demás combustibles.
- Ayuda al cuidado de la salud porque al mejorar la calidad del aire se produce la reducción de enfermedades respiratorias.
- Es un combustible que no puede manipularse y empeorar sus cualidades antes de su utilización por qué no se puede someter a mezcla o degradaciones que afecten a sus propiedades.
- Permite tener un control riguroso y un soporte de los costes de suministro de combustible, a través de los detalles de la transacción que contiene el recibo de venta expedido por la estación de servicio.

6.1.2. Origen del gas natural

El gas natural es un combustible natural por que se encuentra en la naturaleza en las llamadas "bolsas de gas". Estas bolsas están bajo tierra y están cubiertas por capas impermeables que impiden la salida del gas al exterior. También se puede encontrar gas natural acompañando al crudo en los pozos petrolíferos llamado gas natural asociado y en yacimientos exclusivos de gas natural llamados gas natural no asociado. La teoría de formación del gas natural no existe verídicamente, pero se ha asegurado que proviene de un proceso análogo al de formación del petróleo, por eso, es un material no renovable.

El gas natural está formado por una mezcla de gases cuyos componentes principales son hidrocarburos gaseosos, sobretodo el metano que está en una proporción superior al 70%.

6.1.3. Beneficios económicos, medioambientales y acústicos del GNV

Económicamente el Gas Natural Vehicular es muy competitivo ya que se pueden ahorrar entre el 25% y el 50% en comparación con los motores diésel y gasolina, este porcentaje depende de si es motor 100% de gas natural o si está reconvertido. Por ejemplo, los autobuses de Madrid que han sido reconvertidos a Dual-Fuel están teniendo un ahorro económico del 30%. Además, la composición del precio del gas natural hace que sea más estable los precios frente a las variaciones del precio del petróleo.

En la figura 21 se puede ver una comparativa como tanto los vehículos de distancia larga y pesados con motores Dual-Fuel y con motores 100% GNL, y los vehículos de distancia corta y menos pesados con motores GNC permiten hacer más kilómetros que los vehículos convencionales con un precio fijo:



Figura 21. Comparativa económica de kilómetros recorridos.

En porcentajes el gas natural vehicular es un 50% más económico que la gasolina, un 30% respecto al gasóleo y un 25% respecto al GLP (Gas Licuado del Petróleo) que es otro gas empleado como carburante.

Observando los beneficios medioambientales y acústicos, se obtienen estas ventajas al utilizar el GNV:

- Hasta un 85% las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y más del 95% del material en partículas son reducidas. Que son los principales contaminantes atmosféricos en las ciudades.

- Se reducen considerablemente las emisiones de monóxido de carbono (CO).
- Se reducen hasta un 20% las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Que es el principal causante del efecto invernadero.
- No contiene plomo ni trazas de metales pesados.
- No emite dióxido de azufre (SO₂).
- Producen hasta un 50% menos de emisión sonora y vibraciones que los motores Diésel. Esto permite las entregas de mercancías de noche a los centros urbanos y otras localizaciones sensibles, si no con motores Diésel no serían habilitadas.

En la tabla 5 se observan las reducciones de emisiones que el gas natural vehicular puede conseguir respecto a los combustibles tradicionales:

Tabla 5. Reducciones de las emisiones.

	Gasolina	Gasóleo	GLP
NOx	15%	>80%	15%
Partículas	0%	>95%	0%
CO2	30%	15%	12%

Los principales inconvenientes del GNV es el coste de la instalación, su seguridad y la ubicación de los tanques de almacenamiento del combustible. Sobre todo, en la ubicación de vehículos ligeros por que en los casos en que se ha hecho una remodelación ocupa buena parte del maletero.

6.1.4. Diferencia entre GNC y GNL

Se puede ver resumidamente las principales diferencias entre el Gas Natural Comprimido y el Gas Natural Licuado, son los dos tipos de GNV:

Tabla 6. Diferencia simplificada entre GNC y GNL.

	Gas Natural Comprimido (GNC)	Gas Natural Licuado (GNL)
Estado	Gas	Líquido
Condiciones de suministro	Comprimido a 200 bares	Líquido a -160 °C
Autonomía del vehículo	Entre 400 km y 600 km	>1000 km
Tipo de vehículos	Vehículos ligeros o pesados de corto recorrido	Vehículos pesados de largo recorrido

- GNL (Gas Natural Licuado)

Es el gas natural que se somete a un proceso de refrigeración llamado licuefacción para que al condensarse se transforme a estado líquido, facilitando su transporte para largas distancias. Este proceso consiste en llevar el gas a una temperatura aproximada de $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a una presión de 1 bar (presión atmosférica), para así poder reducir su volumen. El proceso de licuefacción tiene en general dos fases; la primera es enfriamiento y condensación, y la segunda se realiza el "flashing" (es un proceso adiabático donde se baja la presión a casi atmosférica). Durante el proceso de licuefacción, impurezas como los hidrocarburos pesados y otras partículas son eliminados, para así poder reducir el impacto del medioambiente.

Es un líquido criogénico (criogénico son los gases que se mantienen en estado líquido a temperaturas que tienen puntos de ebullición inferiores a $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) que es inodoro por naturaleza, incoloro, no es corrosivo, no es tóxico y es transparente como el agua. Está compuesto principalmente por metano y junto con etano, propano y otros hidrocarburos más pesados. En cuanto se calienta el GNL, se regasifica (se transforma de nuevo en un gas).

Sus principales características son:

- Compuesto principalmente de metano, incoloro y líquido criogénico.
- Punto de ebullición atmosférico de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Densidad de $458\text{-}463\text{ kg/m}^3$ (dependiendo de la composición).
- 1 m^3 de GNL a presión atmosférica es igual a 600 m^3 de gas natural, por eso permite reducir el volumen en 600 veces.

De cara a la protección, hay que tener en cuenta la temperatura criogénica del GNL por que al estar cualquier cuerpo en contacto con el líquido se congelaría al instante cualquier tejido orgánico. Por eso se ha de utilizar el Equipo de Protección Personal (EPP) diseñado, tal y como se especifica en las normas pertinentes de la UE o en la norma NFPA 52-2013. Se obliga la utilización de ropa de protección, gafas y guantes cuando se manipule el GNL siempre que haya una posibilidad de que se libere. Sin embargo, el gas en su estado líquido no es explosivo.

Los tanques de GNL están diseñados para ser tan seguros como los sistemas de combustible convencionales, los cuales están sujetos a pruebas rigurosas para ofrecer las máximas garantías de fiabilidad.

En la tabla 7 se muestra las siguientes características peligrosas en comparativa con los combustibles convencionales:

Tabla 7. Características peligrosas en comparativa de varios combustibles convencionales.

	GNL	GLP	GASOLINA	FUELOIL
Inflamable	Si	Si	Si	Si
Asfixiante	No (A no ser que está en un espacio confinado)	Si, una mayor densidad estimula la acumulación	Si, una mayor densidad estimula la acumulación	No (A no ser que está en un espacio confinado)
Otros peligros que pueden afectar en la salud humana	Baja temperatura	No	Irrita a los ojos, narcosis, náuseas y otros...	Irrita a los ojos, narcosis, náuseas y otros...
Límites de inflamabilidad en el aire (%)	5-15	1,8-9,5	1,2-7,1	0,6-7,6
Presión almacenada	Ambiente, excepto en algunos pequeños contenedores	Presurizado	Ambiente	Ambiente
Comportamiento en caso de derrame	Se evapora formando nubes inflamables y visibles que se dispersan fácilmente	Se evapora formando una nube de vapor explosiva que se agarra a tierra	Forma una piscina inflamable, se requiere una limpieza del medio ambiente	Forma una piscina inflamable, se requiere una limpieza del medio ambiente; potencialmente a largo plazo dependiendo del tipo específico de aceite

Las desventajas, es el alto coste de almacenamiento criogénico tanto en los depósitos de los vehículos como en la creación de infraestructuras de estaciones de distribución del GNL.

- GNC (Gas Natural Comprimido)

El Gas Natural Comprimido es una simple mezcla de gases a presión atmosférica y temperatura ambiente (1 atmósfera y 20 °C) donde destaca el CH₄ (metano) que forma el 90% de la totalidad de la composición, pero al tener una densidad baja, no se puede licuarlo a bajas presiones.

Se utiliza como combustible para vehículos automotores al comprimirlo dentro de cilindros de acero especial a una presión de entre 200 y 220 bares. Como no está líquido, se llena el depósito al 100%. Al tener un alto índice de hidrógeno por carbono, hace que produzca menos CO₂ por unidad de energía entregada, en comparación con otros hidrocarburos más pesados

(con más átomos de carbono y un menor radio H/C). Es un gas transparente, inodoro y no corrosivo. A parte del metano, tiene hidrocarburos como el etanol y el propano y otros gases como nitrógeno, helio, dióxido de carbono, compuestos de azufre y vapor de agua.

Su composición depende del yacimiento donde se extrae y del tratamiento posterior que le da la empresa gasera, por eso, es difícil establecer con claridad sus características. La mayor parte del GNC proviene de tres tipos de pozos; Pozos naturales de gas y condensados, pozos de petróleo y pozos de metano de lecho de carbón.

El resumen de las propiedades en valores medios que tiene son:

- Componente principal: CH₄ (metano)
- Temperatura de ebullición a 1 atm: -160 °C
- Peso específico: 0,808
- Densidad en fase líquida: 0,423 kg/l
- Poder calorífico: 1.990 kcal/kg
- Índice octano: 115 (es la capacidad antidetonante del carburante cuando se comprime dentro del cilindro de un motor)
- Densidad relativa al aire: 0,625

En el caso de un derrame es más seguro que otros combustibles por que el gas natural es más ligero que el aire y se dispersa rápidamente cuando se suelta. Para evitar estos derrames, se almacena en depósitos cilíndricos con paredes gruesas echas de acero, aluminio o con materiales compuestos. Se suele añadir un odorizante a base de azufre para facilitar la detección de fugas.

Otro de los problemas es la inflamabilidad, pero el GNC al haber un derrame se mezcla rápidamente con el aire y solo se hace inflamable cuando la mezcla tiene entre un 5 a 15% de gas natural. Si tiene menos de 5% no se puede quemar y si tiene más del 15% de gas natural no hay suficiente oxígeno para permitir que se queme.

La ventaja económica que tiene es que es barato obtener el GNC, por eso cuesta un 50% menos que la gasolina para la utilización como combustible.

6.1.5. Consideraciones de seguridad en los combustibles gaseosos

Las normas de seguridad para todos los combustibles, sean líquidos o gaseosos, aseguran generalmente que el riesgo de un incendio sea realmente muy bajo en condiciones normales de operación. Estas normas incluyen medidas de seguridad con un estricto cumplimiento acerca de la normativa para la instalación y operación de los equipos, y también teniendo en cuenta el sentido común.

Cuando se sufre una colisión o hay un fallo del equipo, incluso en la operación de llenado, puede presentarse el riesgo de fuga. En cualquiera de estas situaciones han de concentrarse tres requisitos para que exista peligro

potencial de incendio o explosión. Primero la filtración del combustible, segundo la situación donde la mezcla del combustible con aire sea una mezcla que esté dentro del rango de inflamabilidad y, tercero que exista una fuente de ignición. Cuando ocurra una filtración y esté presente una fuente de ignición, deberá existir una mezcla del gas dentro del rango de inflamabilidad, siendo el gas natural más liviano que el aire y tiende a dispersarse. Aunque el combustible diésel es el más seguro.

Existen diversas normativas para la seguridad. Las normativas CEPE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa) para los componentes y las instalaciones del gas son las siguientes:

- Componentes GLP: Reglamento CEPE/ONU 67R.
- Componentes GNC y GNL: Reglamento CEPE/ONU 110R.

Estas dos normativas deberán cumplirlas las empresas en sus instalaciones, así como en la fabricación de sus componentes, que deberán ser homologados.

También en la transformación de vehículos autogas/GLP o GNC es obligatorio cumplir en España el siguiente reglamento:

- Sistema de adaptación GLP/GNC: Reglamento CEPE/ONU 115R.

Este reglamento puede ser sustituido por informes de homologación nacional que estén basados en el propio reglamento y que permita adaptarse a las circunstancias particulares de cada país.

6.1.6. Estaciones de servicio gas natural

En España hay 42 estaciones en total de gas natural para GNC y GNL de los cuales 25 están gestionadas por *Gas Natural Fenosa*, las demás marcas son:

- HAM: tiene 10 estaciones
- ENDESA: tiene 2 estaciones
- Monfort: tiene 1 estación
- Vicuña: tiene 1 estación
- VIA AUGUSTA: tiene 1 estación
- SERPAUTO ALPÍ: tiene 1 estación
- Beroil: tiene 1 estación

Próximamente se abrirán 22 nuevas estaciones. La mayoría de estas estaciones están situadas estratégicamente por todo el país pudiendo abastecer los vehículos en cualquier zona de la península. Estas están situadas dentro de una ciudad o en sus alrededores y destaca la gran cantidad de estaciones que hay en las ciudades o zonas económicamente más importantes de España, entre ellas; Cataluña, la Comunidad de Madrid,

País Vasco y las ciudades de Valencia, Sevilla y Zaragoza. En la imagen de la figura 22 se puede ver donde están distribuidas:



Figura 22. Estaciones de Gas Natural en España.

En las figuras 23 y 24 se muestra un esquema de una estación de servicio GNC, de una estación de servicio GNC-GNL y de sus dispensadores:

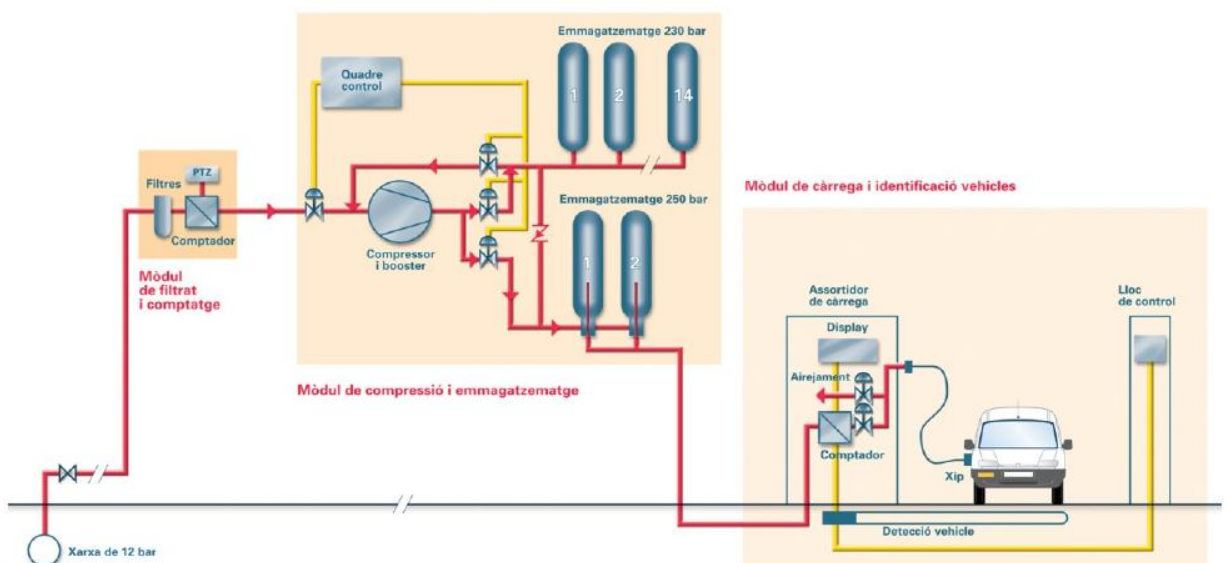


Figura 23. Estación de servicio GNC.

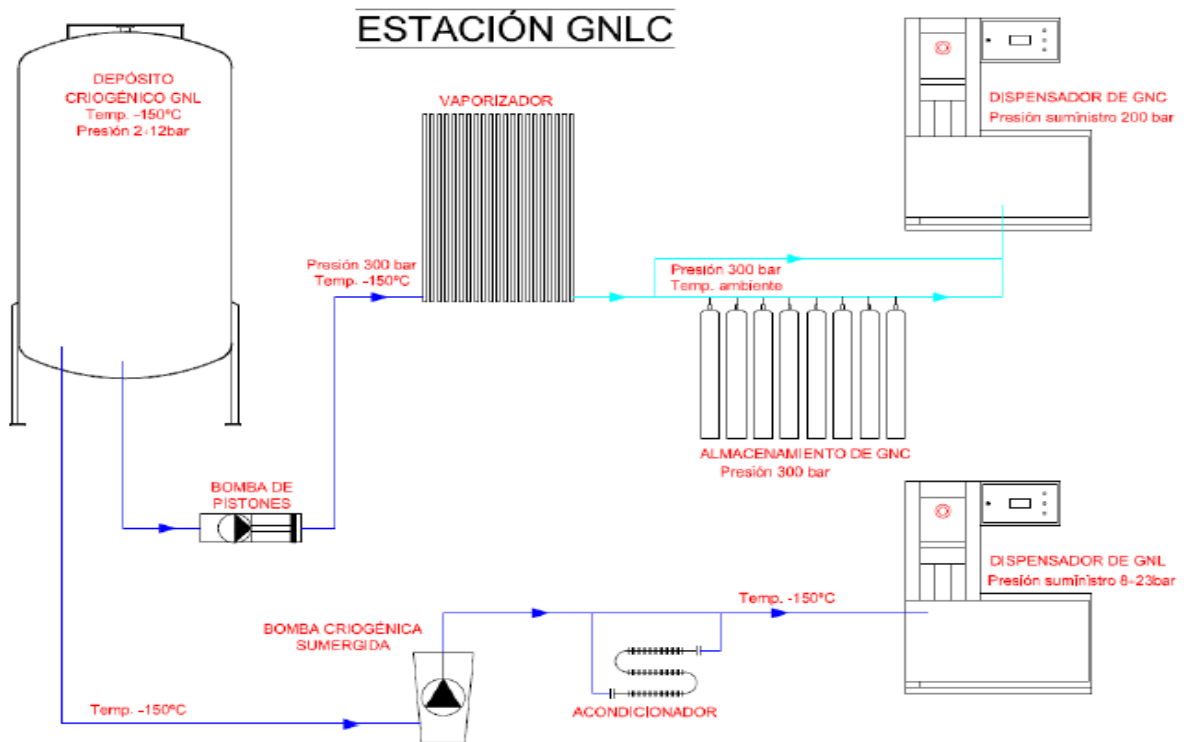


Figura 24. Estación de servicio GNL.



DISPENSADOR GNC



DISPENSADOR GNL

Figura 25. Dispensadores de GNC y GNL.

Como se puede observar, son dispensadores similares a los tradicionales.

Para la carga del GNL se utiliza dos mangueras; una de fase líquido (es la manguera más grande) y la de fase gas (es la más pequeña). Es importante proteger nuestro cuerpo antes del repostaje con los elementos de

protección individual y llevar ropa de manga larga. Primero se ha de conectar la toma de tierra, segundo se abren las tapas de protección del depósito y se mira si están limpias y sin rastro de humedad, tercero conectaremos la manguera de fase líquido y cuarto y último, la manguera de fase gas y dejar la válvula del depósito abierta. Aquí se inicia el repostaje automáticamente y cuando acabe dicho repostaje, hay que proceder con estos pasos; Primero desconectar la manguera de fase gas, segundo desconectar la manguera de fase líquido y por último desconectar la toma a tierra.

Para la carga del GNC, se apaga el motor y en este caso solo tiene una manguera de carga para el vehículo. Es tan fácil como insertarla en la toma de carga del vehículo, parecido como si se fuera a cargar un combustible convencional. Pero, hay dos tipos de manguera dependiendo de la conexión de seguridad; las mangueras tipo palanca y las mangueras de tipo pistola. Las de pistola son prácticamente igual que las de gasolina, pero las de palanca hay que girar una palanca para liberar la válvula de seguridad. También se hace un repostaje automático en que no se tiene ni que aguantar la manguera como en el repostaje de GNL, el sistema mantiene la estanqueidad. Al acabar, hay que soltar el seguro de la pistola o volver a girar la palanca.

6.1.7. Vehículos en España con GNV

Gracias a la fuente de información de GASNAM (ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE GAS NATURAL PARA LA MOVILIDAD) se muestra estos datos del crecimiento que ha tenido en número de vehículos entre los años 2008 y 2015 y ejemplos de vehículos específicos que hay en el mercado trabajando solo con Gas Natural o con un sistema bi-fuel que recoge cualquier mezcla de combustibles entre la gasolina, diésel, GNC y GNL.

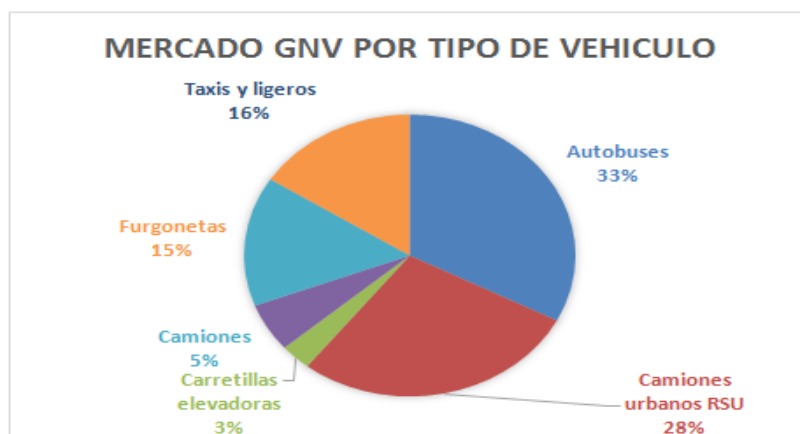


Figura 26. Mercado de GNV por tipo de vehículo.

Se puede comprobar como más de la mitad de los vehículos con GNV son vehículos pesados. Entre las furgonetas, los autobuses y los camiones hacen una suma del 76%. De ahí, se ve como sobretodo se implanta el gas en los transportes con mayor carga.

PARQUE DE VEHÍCULOS GNV Y CONSUMOS DE GN
Febrero 2016



	2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año	Unidades	Consumo GWh/año
Autobuses	846	384,8	962	438,8	1392	556,8	1501	600,4	1531	612,4	1591	636,4	1728	691,2	1649	659,60
Camiones basura	821	247,8	991	287,8	1008	252	1088	272	1101	275,3	1140	285	1200	300	1414	353,50
Carretillas	43	4,3	43	4,3	43	4,3	43	4,3	137	13,7	154	15,4	174	17,4	153	15,30
Microbuses	2	0,2	2	0,2	2	0,2	2	0,2	16	1,6	18	1,8	20	2	3	0,30
Camiones tte	10	4	10	4	10	4	10	4	91	36,4	182	72,8	364	145,6	281	112,40
Furgonetas	180	15,6	445	44,5	445	15,6	475	16,6	410	14,4	574	20,1	804	28,2	753	26,37
Taxis y ligeros	33	3,4	61	6,2	62	3,4	100	5,5	380	20,9	331	18,2	300	16,5	803	44,15
TOTAL	1.935	660	2.514	2.962	2.962	836	3.219	903	3.666	975	3.990	1.050	4.590	1.201	5.056	1.212

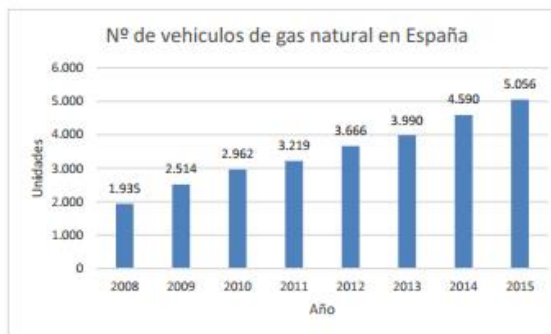


Figura 27. Parque de vehículos de GNV y consumos de GN y número de vehículos de gas natural en España

En la figura 28 se puede ver el incremento desde el año 2008 que se ha tenido en la utilización del gas natural como combustible, sobre todo en los vehículos pesados. Aunque este incremento ha sido más pausado en comparación con el crecimiento del gas en los taxis y ligeros, entre 2008 y 2015 ha crecido un 1300% aproximadamente, sobretodo ha crecido desde el año 2014 al 2015. Pero sobretodo, hay que congratularse de la subida progresiva en el número de vehículos de gas natural en estos últimos años.

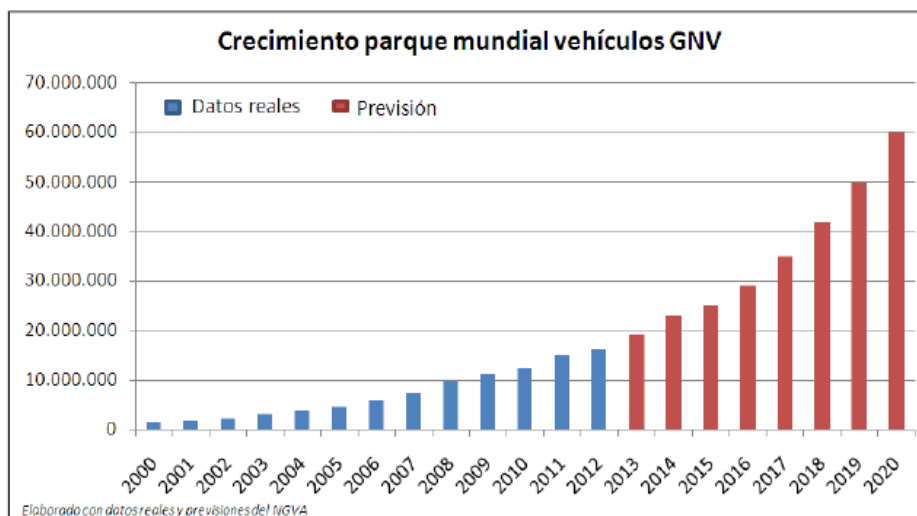


Figura 28. Crecimiento parque mundial vehículos GNV.

En la figura 28 se puede ver como también el crecimiento es en todo el mundo y como según en las previsiones el crecimiento tendrá una pendiente mayor.

Ahora se mostrarán ejemplos de vehículos específicos que hay en el mercado trabajando solo con Gas Natural o con un sistema bi-fuel que recoge cualquier mezcla de combustibles entre la gasolina, diésel, GNC y GNL. En total hay más de 50 modelos propulsados con GNC o GNL en el mercado:

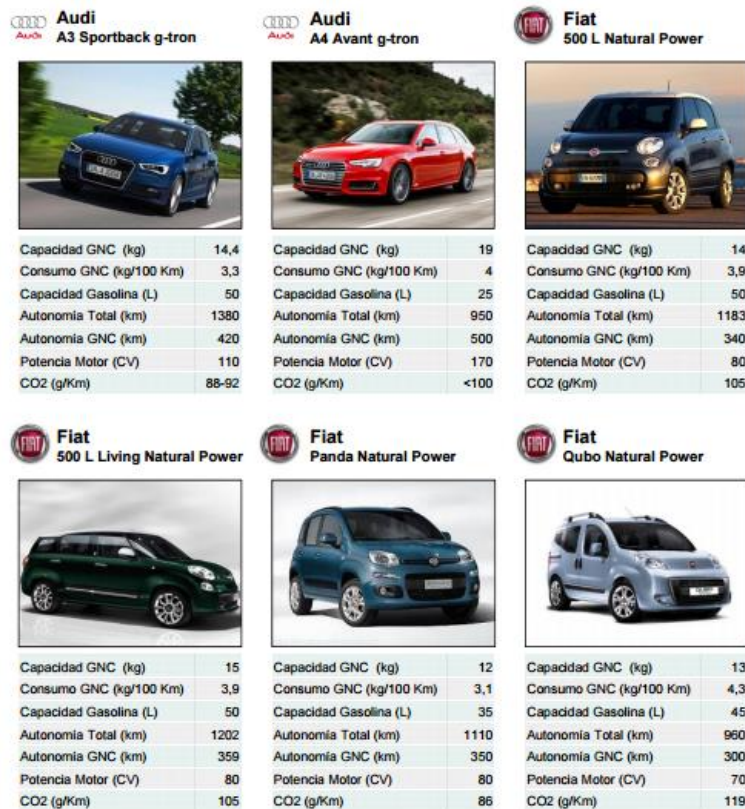


Figura 29. Coches propulsados con GNC.



Figura 30. Furgonetas propulsadas por GNC.

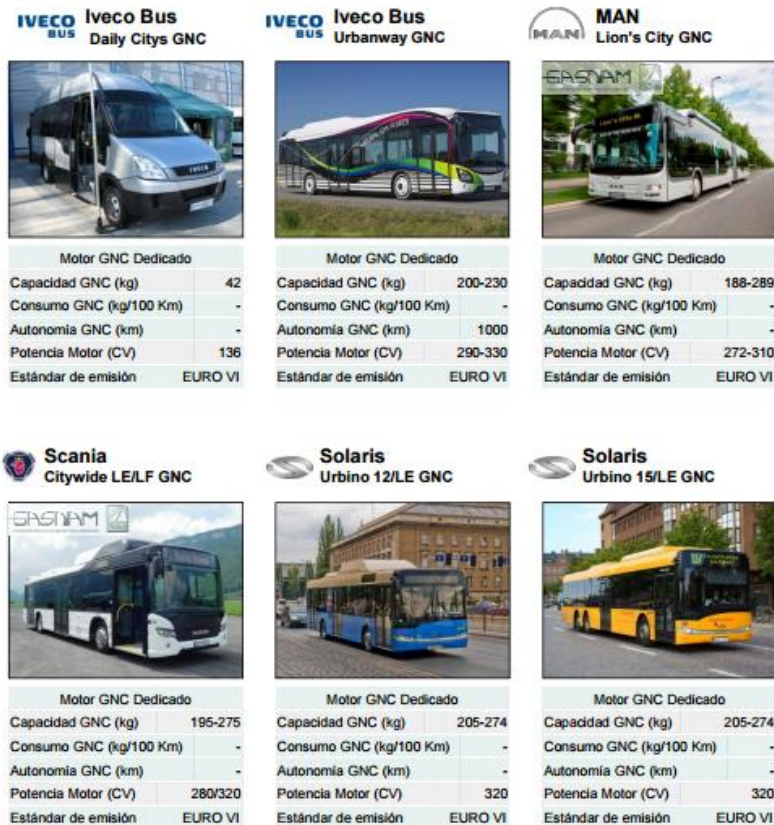


Figura 31. Autocares propulsados por GNC.



Figura 32. Camiones propulsados por GNC y GNL.



Figura 33. Otros vehículos propulsados por GNC y GNL.

CAPÍTULO 7: MOTOR DUAL-FUEL CON GNC

Los motores Dual-Fuel con GNC son motores Diésel, pero con una gran diferencia general; al modificarlos se convierten en un sistema de combustión compartida en paralelo entre el diésel y el Gas Natural Comprimido (GNC). Se utiliza para el ahorro del combustible diésel por el Gas Natural Comprimido que es más barato y más limpio en las emisiones de gases de escape, manteniendo las mismas prestaciones que si se opera solo con la combustión diésel.

El gas natural se inyecta a través de inyectores de GNC situados en el colector de admisión, el gas se mezcla con aire en la cámara de combustión a través de dicho colector. Para la combustión se introduce una pequeña cantidad de combustible diésel en la cámara tras la compresión (una cantidad más pequeña que si fuera una combustión solo de diésel) que se emplea como inyección piloto. Esta pequeña cantidad es la combustión inicial necesaria para quemar el CNG. Se produce el ciclo Diésel explicado anteriormente, pero añadiendo estas dos variantes de cara a reducir el uso del combustible diésel.

El sistema de combustión compartida es en paralelo ya que puede funcionar el motor mediante la combustión compartida del diésel y del GNC o utilizando solo la combustión del diésel.

A partir de un motor Diésel existente y operativo, se instalan los componentes de un sistema de inyección de GNC, en paralelo al equipo original de inyección diésel. Se añade con el objetivo de conseguir en cada momento el mismo par motor y potencia que proporcionaría el motor original, y también con las ventajas de expulsar menos emisiones y con un menor coste final del combustible. Esto se consigue mediante la utilización de una nueva centralita electrónica (ECU) que se encargará de gestionar la inyección tanto del GNC como del diésel.

Los dos sistemas de inyección, tanto del diésel como del GNC, comparten sus informaciones de operación y funcionamiento a través de los sensores que están situados para ambos sistemas. Se comparten la información de cara a poder trabajar eficazmente los dos sistemas en paralelo y así conseguir la mejor combinación posible entre ambos combustibles, para alcanzar un compromiso entre economía de funcionamiento, estabilidad de la combustión, mínimo de gases contaminantes y prestaciones. Así cuando se va reduciendo la cantidad de gasóleo inyectado se aumenta la cantidad de GNC inyectado y así también al revés, ambas a su medida.

7.1. Ventajas del motor Dual-Fuel con GNC respecto al motor Diésel

- Reducción en el coste de combustible: el coste del Gas Natural Comprimido es un 30% menor que el del gasóleo. Los precios de ambos son variables, sobretodo el diésel, pero mirando los datos de los ensayos de una empresa en enero del año 2014, los costes de ambos son:
 - Diésel= 0,969 €/litro
 - GNC 200bar= 0,714 €/kg
- Reducción de las emisiones de gases contaminantes: estas son las reducciones que se consiguen con este sistema:
 - CO₂: Se reduce entre un 10% y un 15%.
 - Partículas: Pueden alcanzar reducciones de hasta el 50%
 - NO_x: Se reduce entre un 35% y un 65%.
- Flexibilidad de operación: en caso de fallida o de no tener un suministro temporal de Gas Natural, el motor puede seguir operando solo con combustible diésel. El sistema hace este cambio automáticamente incluso en circulación a operar solo con gasóleo, aunque se recomienda que se haga el cambio cuando se está parado.

7.2. Características específicas

Las características específicas son:

- No se modifica el motor original: al hacer las modificaciones de un motor Diésel a un motor Dual-Fuel no se modifica ni el equipo de inyección original ni la electrónica del vehículo, para que así pueda funcionar en modo solo Diésel en cualquier momento. Esto garantiza las prestaciones originales del vehículo.
- Avanzado sistema de control de la mezcla gas natural-diésel: una nueva centralita de control es capaz de compartir la información del motor y el vehículo usando el sistema de multiplexado original, lo que permite un control preciso en cada revolución de los parámetros de combustión.
- Alta permisibilidad en las condiciones de uso: dicho motor puede trabajar desde temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, estar fuera de este rango significa que está en condiciones de operación extremas que pueden dañar al buen funcionamiento del sistema.

7.3. Componentes y descripción del sistema de combustión compartida diésel-GNC

El sistema de combustión es bastante complejo y con muchos componentes que se explicarán a continuación. La información de dicho sistema se ha extraído gracias a una empresa de autobuses. Pero para poder simplificar en dos partes este sistema, podemos dividirlos en función de la presión de cada parte. Una primera parte de alta presión y una segunda parte de baja presión que quedan separadas por una válvula reguladora de presión:

- Alta presión: va desde el depósito de GNC hasta la válvula reguladora de presión, esto incluye las válvulas en los depósitos que tienen un cierre automático y los cierres manuales, y todos los demás componentes que pertenecen a esta parte.
- Baja presión: incluye todos los componentes que hay después de la válvula reguladora de presión hasta el motor y que operan con el gas a una presión reducida.

Seguidamente se podrá ver los componentes del sistema que se añaden al motor Diésel en paralelo para que se convierta en motor Dual-Fuel y después una pequeña explicación de cada uno:

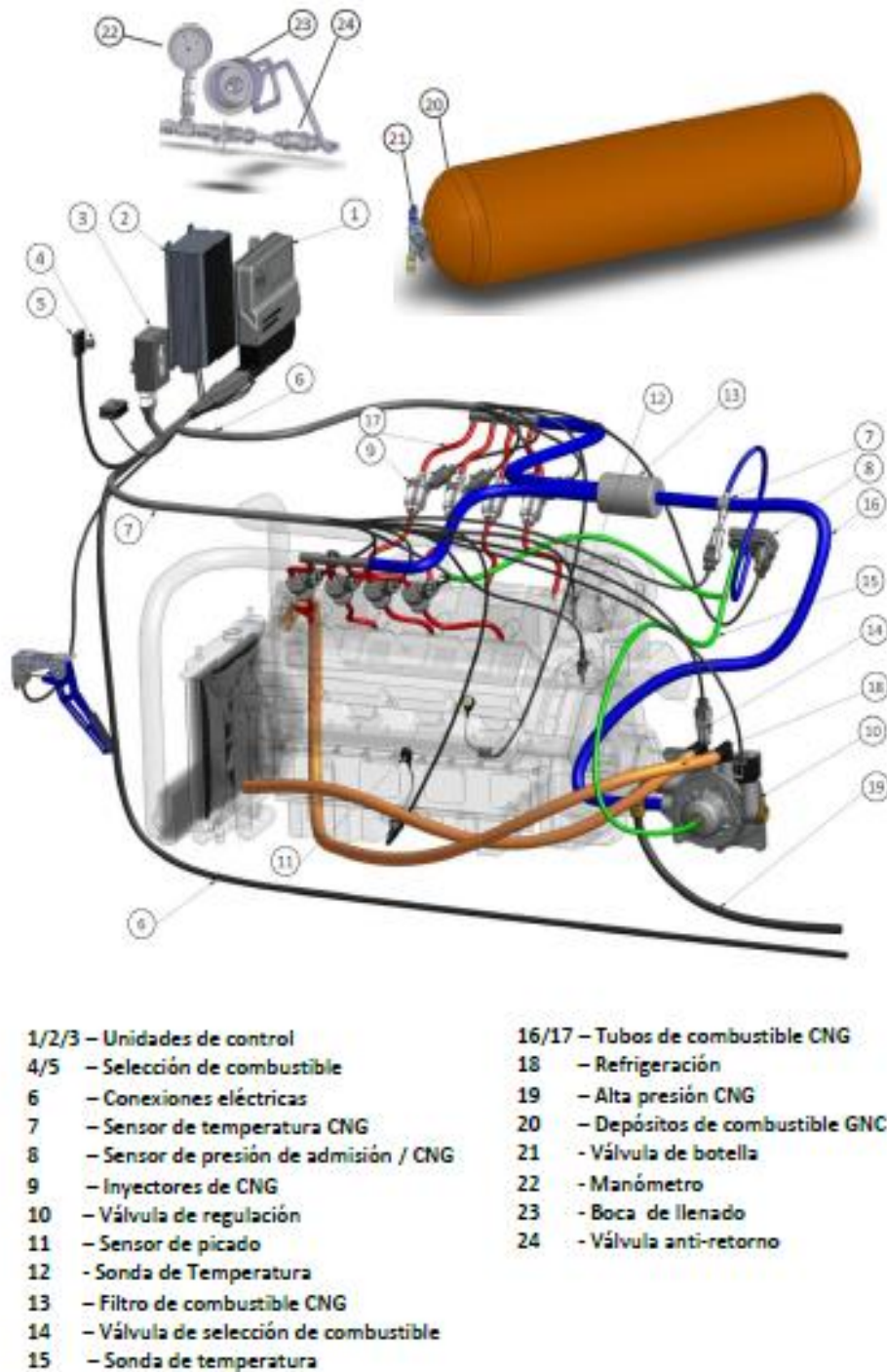


Figura 34. Componentes conversión motor Diésel a Dual-Fuel.

- 1/2/3 –Unidad de control de alimentación GNC: son un conjunto de centralitas electrónicas que controlan la cantidad de combustible que se inyecta tanto del diésel como del GNC. La cantidad que se inyecta depende de las condiciones de trabajo del motor, como son las revoluciones, grado de carga, temperatura del motor y del combustible, presión de admisión y del combustible.
- 4/5 –Selector de combustible: este selector dispone de un botón de selección de combustible que se encuentra situado en el cuadro de

instrumentos. Además, el selector indica al conductor el nivel de gas comprimido en los taques (cantidad disponible) y la correcta operación del sistema.

- 6 –Conexiones eléctricas: es el cableado para las señales que está especificado para cada sistema y es independiente de la instalación original del vehículo.
- 7 –Sensor de temperatura GNC: mide la temperatura del gas para evitar la congelación de las válvulas.
- 8 –Sensores de presión de admisión e inyección: es un equipo que incluye un sensor de presión en la zona de admisión del aire y un sensor de presión de GNC que controla la presión de inyección del gas natural en la zona del colector de admisión.
- 9 –Inyectores de gas: se encargan de alimentar y de regular el caudal del gas. Ajustan e inyectan el gas en la zona de admisión del aire. Están situados junto al bloque motor y se instala un inyector por cada cilindro del motor.
- 10 –Válvula reguladora: como se ha dicho, separa las partes de alta presión y baja presión. Se encarga de variar o adecuar la presión que tiene el GNC en los depósitos que es aproximadamente de 200 bar a la presión que trabajan los inyectores que es entre 1.1 bar a 2.5 bar. La válvula está fabricada de aleación de aluminio el cual admite una presión de entrada de hasta 26 MPa.
- 11 –Sensor de picado: detecta la posibilidad de que haya una detonación incontrolada en la combustión y ajusta los parámetros para evitarlo.
- 12 –Sonda de temperatura de escape: mide la temperatura de los gases de escape.
- 13 –Filtro de combustible GNC: está situado posteriormente o aguas abajo de la válvula reguladora. Se encarga de impedir el paso de partículas que puedan venir junto al combustible hacia los inyectores para así evitar posibles daños al motor de combustión.
- 14 –Válvula de selección del combustible: su función es cortar o dar el paso al gas en función del modo de trabajo. Está situada en la entrada de la válvula reguladora.
- 15 –Sonda de temperatura del refrigerante: mide la temperatura del refrigerante, esta información servirá para que la unidad de control pueda gestionar adecuadamente la inyección.
- 16 y 17 –Tubos flexibles de combustibles y uniones: son tubos flexibles compatibles con el GNC los cuales son necesarios para las instalaciones de combustibles de baja presión. En esta instalación, es necesario este tipo de tubo entre la válvula reguladora de presión y los inyectores del Gas Natural.

- 18 –Refrigeración/calefacción: se utiliza el sistema de agua del motor para conseguir la correcta temperatura de funcionamiento para la válvula reguladora y así evitar posibles problemas por congelación.
- 19 –Tubos rígidos de combustible y uniones: estos tubos pertenecen a la zona de alta presión que es entre los depósitos y la válvula reguladora de presión. Son tubos compatibles con el GNC y están hechos de acero inoxidable.
- 20 –Depósitos de combustible de GNC: los depósitos de combustible son del tipo GNC-1 (metálico) que almacenan el Gas Natural comprimido a una presión de 200 bares.
- 21 –Válvula de botella: es como una especie de botella que está formada por una válvula automática de botella GNC, que a su vez incluye;
 - Válvula manual.
 - Dispositivo de sobrepresión de accionamiento térmico.
 - Dispositivo limitador de caudal.

Todo formando un conjunto multifuncional.

- 22 –Manómetro: mide la presión del gas en los depósitos y esta medición se exporta a una señal que se utiliza como indicación del nivel de combustible del GNC con un sensor pasivo para reportar el nivel del combustible.
- 23 –Boca de llenado: es por donde se llenará los depósitos de forma rápida y segura. Está fabricada en acero resistente a la corrosión y está equipada con una protección anti-polvo.
- 24 –Válvula anti-retorno: está instalada conjuntamente con la boca de llenado y se utiliza para evitar el retorno del flujo de gas hacia la boca de llenado. También todo forma un conjunto multifuncional.

7.4. Combustión en motores Dual-Fuel

Es muy importante controlar la correcta combustión entre los dos combustibles de distintas características (Diésel y GNC) que se produce en la cámara de combustión. Para ello el nuevo sistema de inyección de GNC comparte la información de operación y funcionamiento del sistema de inyección diésel. Trabajan en paralelo ambos sistemas y así se consigue la mejor combinación de ambos combustibles; mejor economía de funcionamiento, mejor estabilidad de la combustión y mínimos gases contaminantes. De ahí la importancia de poder compaginar correctamente ambos combustibles.

La combustión en motores Dual-Fuel presenta similitudes con la combustión de los motores de gasolina y diésel, pero tiene sus diferencias. A partir de los estudios que han hecho varias entidades y que lo ha indicado en la

Asociación Europea de Gas Natural Vehicular, se ha detectado estas diferencias comparado con la combustión diésel:

- La presión máxima en el cilindro es menor operando con combustión Dual-Fuel que con diésel.
- Los tiempos de combustión en motor Dual-Fuel son más largos a bajas velocidades y a bajas cargas que en motor Diésel. Las mezclas de combustión son muy pobres y por eso se sustituye poco combustible gasóleo por GNC, se reduce solo un 10%, ya que la combustión es lenta e inestable. En estas condiciones, la admisión es prácticamente solo aire, por eso la combustión es similar al motor Diésel.
- Los tiempos de combustión en motor Dual-Fuel son en cambio más cortos a altas velocidades y altas cargas que en motor Diésel. También varía en que se aumenta el uso de GNC en vez del gasóleo. Se inyecta más GNC y se reduce hasta un 40% el uso de diésel.

Si nos fijamos en el consumo y las emisiones, también hay diferencias entre ambos motores:

- Se reduce la cantidad de humo emitido en todas las condiciones de operación si es utilizado Dual-Fuel frente al diésel.
- También se reduce las emisiones de gases contaminantes, aunque dependen de las condiciones de operación del motor y del nivel de sustitución del gasóleo. Solamente con que se reduzca el uso en 50% del gasóleo sobre la totalidad que se utilizaría en un motor original Diésel se tiene las reducciones que se han explicado en el apartado de ventajas del motor Dual-Fuel sobre el Diésel.

En el caso de largos trayectos que circulan cientos de kilómetros a velocidades constantes como pueden tener que hacer camiones nacionales o transnacionales, las condiciones de operación son más estables, entonces se reduce la utilización del gasóleo que puede ser de hasta el 80%.

7.5. Ciclo Diésel en Dual-Fuel

El ciclo es el mismo que en el Diésel, pero con la variante de la introducción del gas. En las imágenes de las figuras 35 a 38 se puede observar:



Figura 35. Fase de admisión.



Figura 36. Fase de compresión.



Figura 37. Fase de expansión.



Figura 38. Fase de escape.

7.6. Sistema operacional del conductor

El modo de operación en el cuadro de mandos del conductor es exactamente el mismo que si fuera con un motor Diésel. Ni siquiera se incluye nuevas funciones en las pantallas o en los mandos originales. Solamente se añade un selector de combustible y un indicador de nivel de combustible disponible en los depósitos GNC al cuadro de mandos original.

Cuando se arranca el motor mediante la llave de contacto, si está puesto el modo de funcionamiento con gas, la unidad de control evaluará las condiciones de operación y comenzará a inyectar el gas cuando el motor ha alcanzado una determinada temperatura de funcionamiento. Por eso, al poner en servicio el sistema, siempre estará unos minutos funcionando solo con combustible diésel.

El selector de combustible se encarga de indicar la cantidad del nivel de gas para que pueda estar informado el usuario. También indica si está funcionando el sistema Dual-Fuel o solo con diésel e indica cuando hay errores, advertencias y otras situaciones de emergencia. Además, permite elegir entre modo Diésel o modo Dual-Fuel mediante un pulsador.

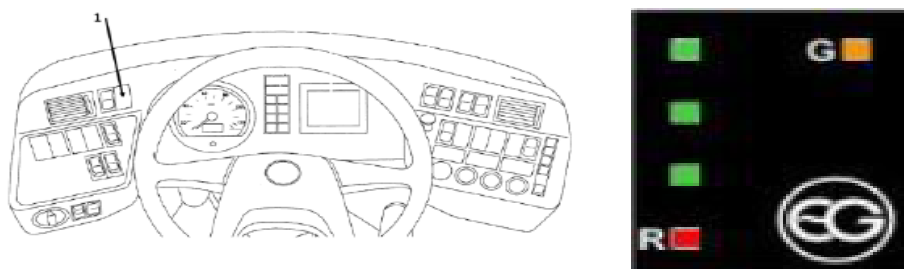


Figura 39. Selector combustible y configuración.

En la imagen de la izquierda de la figura 39 está donde iría situado el selector de combustible en el cuadro de mandos aproximadamente (varía dependiendo del vehículo) y la imagen de la derecha como está configurado.

Las funciones de cada comando de la imagen de la derecha son:

1. Rojo: es el indicativo para saber que está en reserva el combustible
2. Verde: tiene diferentes indicativos y son para indicar el nivel del gas en el tanque.
3. Naranja: en este caso si el LED está encendido significa que funciona en modo Dual-Fuel, si está apagado indica que trabaja en modo Diésel.
4. Zumbador: tiene un zumbador para indicar cuando tiene algún tipo de error, advertencia y otras situaciones de emergencia.
5. Botón: no se aprecia en la figura 39, pero tiene un botón para poder cambiar del modo Diésel al Dual-Fuel o al revés.

7.7. Metodología de puesta en funcionamiento

Es necesario crear una metodología de cara alcanzar el objetivo; Poner en funcionamiento real el sistema Dual-Fuel a camiones o autobuses.

Se hace para poder tener efectividad este proyecto de reforma en los motores Diésel. Esta metodología explica los pasos a seguir para incluir vehículos modificados a motor Dual-Fuel en las carreteras públicas. Los procedimientos son los siguientes y en este orden:

1. Instalación de nuevos equipos: se instalan y se fijan todos los componentes descritos anteriormente.
2. Ajuste y calibración: se preparan todos los sistemas electrónicos para que puedan funcionar correctamente al igual que graduar los inyectores de GNC con los inyectores del Diésel. También ver si funcionan correctamente los sensores. Todo esto se hace en un circuito cerrado para hacer una serie de pruebas de funcionamiento. El circuito cerrado ha de estar preestablecido y con parámetros perfectamente conocidos para poder asegurar la repetitividad de los ensayos efectuados.
3. Ensayos: también en circuito cerrado, se hacen ensayos para comprobar el buen ajuste y calibración de los componentes del sistema para que pueda funcionar sin dificultad. Se consigue unos resultados como datos de partida. Para así poder trasladar el prototipo a la estación ITV para documentar la transformación adecuada y poder circular libremente por las vías públicas.

4. Nuevos ajustes: a partir de los resultados tanto de los ensayos como en la ITV se hacen los ajustes necesarios para que pueda circular sin restricciones por la legislación vigente.
5. Nuevos ensayos: se hacen nuevos ensayos en circuito cerrado y por la vía pública para acabar de optimizar el funcionamiento del transporte pesado.
6. Puesta en funcionamiento en servicio real: se pone en funcionamiento en servicio cuando se ha alcanzado el grado de optimización suficiente para obtener datos reales de funcionamiento y determinar de forma fiable el ahorro de gasto en combustible y de emisiones de gases.

En el caso de empresas grandes. Primero se debería hacer pruebas para un prototipo, luego hacer para una pequeña flota y posteriormente si salen los resultados positivos, poder reformar a este nuevo sistema para toda la flota de camiones o autobuses.

7.8. Ejemplos de resultados y ensayos

Debajo se puede ver un ejemplo del resumen de un ensayo hecho por la empresa de autobuses de Madrid:

Operación en DIESEL		Operación en COMB. COMPARTIDA	
Coste del Combustible			
Diesel = 0,969 € / litro		GNC 200bar = 0,714 €/kg	
Equivalencia energética			
El kJ de CNG es un		0,54 % mas barato que	
Ensayo vehiculo 6847		Ensayo vehiculo 6849	
Ensayo en Diesel		Ensayo en Diesel	
Distancia 210,1 km		Distancia 210,2 km	
Consumo gasoil 136,17 litros		Consumo gasoil 134,5 litros	
64,8 litros / 100 km		63,98 litros / 100 km	
Ensayo en Combustión Compartida		Ensayo en Diesel	
Distancia 229,4 km		Distancia 229,5 km	
Consumo gasoil 105,11 litros		Consumo gasoil 149,82 litros	
GNC 41,15 kg		Consumo gasoil 65,28 litros / 100 km	
Consumo gasoil 45,81 litros / 100 km			
GNC 17,93 kg GN / 100km			
Coste Economico en Combustible		Coste Economico en Combustible	
Diesel 44,39 € / 100km		Diesel 63,26 € / 100km	
GNC 12,81 € / 100km			
Total 57,22 € / 100km			
Aplicando las correcciones obtenidas de los ensayos			
Coste Economico en Combustible operando en Combustion Compartida		Coste Economico en Combustible operando en Diesel	
Total 57,2 € / 100km		Total 64,06 € / 100km	
AHORRO 10,7 %			

Figura 40. Ensayo autobuses.

Con el precio del GNC y del diésel en el momento de hacer los ensayos, el resumen del ensayo muestra que habiendo hecho cada autobús un total de 229,5 km aproximadamente, el vehículo con el sistema Dual-Fuel ha

ahorrado un 10,7% comparado con el vehículo con el tradicional motor Diésel. Si se incrementara esta distancia el ahorro económico sería mayor.

En la figura 41 se puede ver otro ejemplo de resultados que hizo una empresa de Madrid en un autobús en el año 2013 con simplemente los ajustes de calibración iniciales sin llevar a cabo ninguna optimización:

MEDICIONES	SEGUNDA	PRIMERA
Velocidad promedio total (km/h)	13,42	13,74
Minutos viaje totales	1.026	918
Consumo gas (kg/100 km)	17,93	--
Consumo energético gas (MJ/100 km)	1.204	--
Consumo gasoil (l/100 km)	45,81	64,80
Consumo energético gasoil (MJ/100 km)	1.637	2.316
Consumo energético total (MJ/100 km)	2.841	2.316
Repostado gas (kg)	41,15	--
Repostado gasoil (l)	105,11	136,17
Km totales	229,4	210,1

Figura 41. Resultados de ensayos en autobuses año 2013.

En los resultados se pueden observar dos mediciones, la primera se ha realizado solo con la combustión diésel en forma original y la segunda con la combustión Dual-Fuel. En ambas hicieron el mismo recorrido y pruebas por el circuito cerrado.

Teniendo en cuenta el precio medio del gasoil y del GNC en el año 2013 que fue de:

- Precio gasoil = 0,97 €/l o 1,16 €/kg o 2,71 céntimos de €/MJ.
- Precio GNC = 0,526 €/Kg o 0,33 €/m³ o 0,78 céntimos de €/MJ.

Relacionando los consumos con los precios, da estos resultados:

- Segunda medición)
 - Consumo GNC: $\frac{17,93\text{kg}}{100\text{km}} \cdot \frac{0,526\text{€}}{\text{kg}} = \frac{9,43\text{€}}{100\text{km}}$
 - Consumo gasoil: $\frac{45,81\text{l}}{100\text{km}} \cdot \frac{0,97\text{€}}{\text{l}} = \frac{47,34\text{€}}{100\text{km}}$
 - Consumo total: 47,34 + 9,43 = 56,8 €/100 km
- Primera medición)
 - Consumo total = gasoil: $\frac{64,8\text{l}}{100\text{km}} \cdot \frac{0,97\text{€}}{\text{l}} = \frac{62,85\text{€}}{100\text{km}}$

Ahora relacionando el consumo energético con los precios, da estos resultados:

- Segunda medición)
 - Consumo GNC: $\frac{1204\text{MJ}}{100\text{km}} \cdot \frac{0,78\text{céntimos€}}{\text{MJ}} = \frac{939,12\text{céntimos€}}{100\text{km}}$

- Consumo gasoil: $\frac{1637MJ}{100km} \cdot \frac{2,71céntimos€}{l} = \frac{4436,27céntimos€}{100km}$
- Consumo total: $4436,27 + 939,12 = 5375,39céntimos€/100km$
- Primera medición)
 - Consumo total = gasoil: $\frac{2316MJ}{100km} \cdot \frac{2,71céntimos€}{MJ} = \frac{6276,36€}{100km}$

Por último, se calcula el coste del repostado:

- Segunda medición)
 - Consumo GNC: $41,15kg \cdot \frac{0,526€}{kg} = 21,6449€$
 - Consumo gasoil: $105,11l \cdot \frac{0,97€}{l} = 101,9567€$
 - Consumo total: $101,9567 + 21,6449 = 123,6€$
- Primera medición)
 - Consumo total = gasoil: $136,17l \cdot \frac{0,97€}{l} = 132€$

Además de hacer más kilómetros en la segunda medición se puede analizar que en esta medición tiene menor consumo y menor gasto en todos los casos comparando con la primera medición. No hay mucha diferencia entre estos resultados, pero se puede mejorar si los autobuses hicieran más recorrido y mejorarán aún más cuando se afine el sistema y se optimice los parámetros de funcionamiento. Pudiendo ser el sistema Dual-Fuel rentable a medio plazo. Si se considera que de media un autobús recorre 55000 km al año, el ahorro anual medio se puede estimar en 4000 € con el coste citado de los combustibles. Para verificar el ahorro, aprovechando los cálculos de los consumos con los precios:

- Combustión Dual-Fuel: $55.000km \cdot \frac{56,8€}{100km} = 31240€$
- Combustión Diésel: $55.000km \cdot \frac{62,85€}{100km} = 34567,5€$

El ahorro anual real es de: $34567,5 - 31240 = 3327,5€$

Teniendo en cuenta, como se ha dicho antes, los resultados son con un sistema poco optimizado.

En contra, se puede ver que el consumo energético total es mayor en la segunda medición. Esta medición es mejorable a partir de la optimización, por eso se podrá reducir. Igualmente, al consumir menos gasoil, el sistema Dual-Fuel es menos contaminante, un 4,5% menor.

7.9. Imágenes de la situación del depósito del GNC en camiones y autobuses.



Figura 42. Localización depósito parte trasera cabina en camiones.

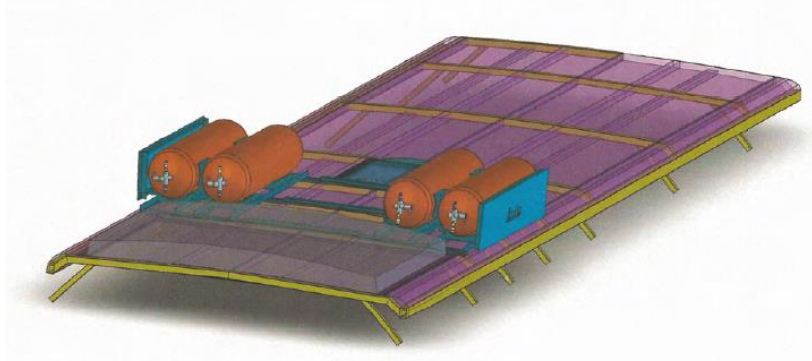


Figura 43. Localización depósito zona superior cabina en autobuses.



Figura 44. Localización depósito parte superior en autobuses.

7.10. Empresa: *Evarm*

Se realizó una visita a la empresa Evarm situada en la localidad de San Baudilio de Llobregat donde tienen unas instalaciones de más de 600m² para poder hacer la transformación y las pruebas de verificación necesarias. Es el primer centro legal en España especializado en la transformación de

motores Diésel o gasóleo a motores Dual-Fuel. Transforman vehículos pesados de cualquier marca de media y larga distancia, maquinaria industrial y otros vehículos, tanto privados como de servicio público. Transforman camiones que han sido fabricados desde la normativa Euro III a la normativa Euro VI, sobretodo camiones de la Euro IV y Euro V porque algunos de la Euro III son demasiado antiguos para poner el sistema y los de la Euro VI aún no existe un sistema Dual-Fuel suficientemente avanzado para poder ser introducido.

Instalan todos los componentes necesarios para que los motores puedan trabajar con GNC o GLP. Tienen tres formatos de depósitos; de pequeña, media y grande capacidad, donde el más grande tiene una capacidad de hasta 150m³. En los camiones se suele instalar bloques de 4 depósitos con un recorrido máximo de 800 km.



Figura 45. Depósitos en el camión.

La instalación se realiza en el taller y es muy parecida a la explicada anteriormente, con la importancia de tener un reductor para poder reducir la presión que llega el gas a los inyectores. Cada instalación varía dependiendo del camión, está depende de estos factores:

- Tamaño del vehículo.
- Potencia del vehículo.
- Ruta y perfil del trayecto que realizará el vehículo.



Figura 46. Imagen taller con los camiones.

Después de la instalación, se realizan diferentes pruebas en un banco de potencia con el objetivo de verificar y calibrar que el rendimiento y la potencia del camión sea el mismo trabajando solo con gasóleo que con

Dual-Fuel. Si esta varía, se realizan las modificaciones necesarias, por ejemplo, hacer que trabaje el motor con una mayor cantidad de gasóleo que la anterior prueba. Dicho banco dispone de medición de consumo y medición de emisiones para poder hacer los cambios pertinentes.



Figura 47. Imagen banco de mediciones.

También se verifica con rigurosidad la estanqueidad de todo el sistema, el gas es muy peligroso y se mira que no se den fugas en ninguna parte del sistema. Por esta razón, todos los elementos de la instalación tienen que cumplir la normativa europea R110 para el GNC y la normativa R67 para el GLP, además la unidad del control del sistema de Evarm está validada y homologada. Este sistema es uno de los más complejos y peligrosos del mercado, de ahí la importancia de garantizar la máxima seguridad.

El tiempo de la instalación dura entre 4 y 7 días y su coste está entre los 12000 € y los 15000 €. El precio depende de los factores dichos anteriormente.

En lo que se refiere al consumo y la contaminación, la reducción del diésel es de un 50% pudiendo llegar a ser el del 55%. Así puede llegar a reducir 130.000 toneladas de emisiones. Debajo se puede ver un ejemplo de la reducción que se puede tener en una ruta desde Barcelona a Madrid.

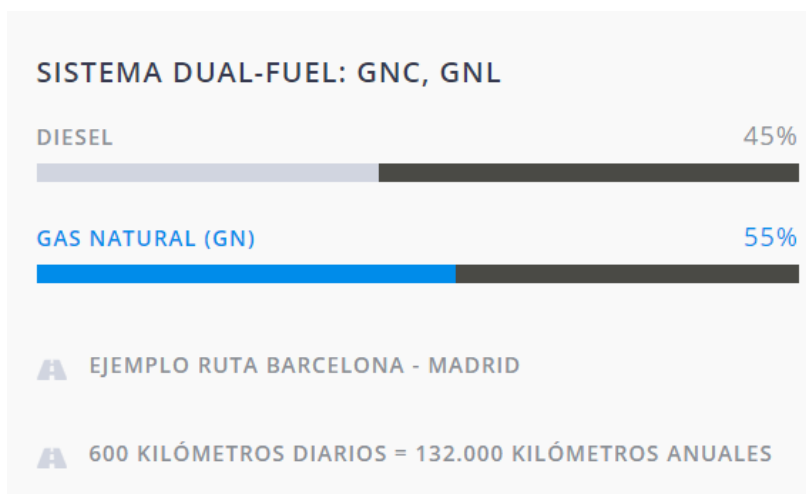


Figura 48. Comparativa del consumo en ruta Barcelona-Madrid.

El objetivo de sus transformaciones, es el de reducir costes en el combustible, maximizando el consumo de combustibles más económicos. Siempre de forma fiable y duradera. Por esta razón, los clientes buscan esta inversión para que les salga rentable en unos años y por la exigencia de los clientes en que buscan unos transportes lo más ecológicos posibles.

En la visita se ha podido ver directamente como las empresas sí que están influidas en el cuidado del medio ambiente y buscan medidas de mejorarlo como esta transformación de sus motores. También se ha podido ver de una forma real y directa como es el sistema estudiado en este trabajo.



Figura 49. Imagen actuación en taller.

CAPÍTULO 8: MOTOR DUAL-FUEL CON GNL

El sistema Dual-Fuel con GNL es un sistema muy similar al explicado en el apartado 6 con GNC, pero con la diferencia de que el gas en el depósito está en estado líquido. Su función es la misma, sin embargo, tiene unos componentes diferentes.

También, a diferencia del capítulo 7 en que ya había un modelo generalizado, se buscará poder generalizar el modelo de combustión a partir de la búsqueda de los elementos reales y específicos de una empresa de camiones. Como se ha descrito en el objetivo, este apartado se centrará en los camiones que es el ámbito donde más se utiliza el GNL para los transportes por carretera.

La descripción del modelo desde el depósito de Gas Natural Licuado (GNL) al motor Dual-Fuel será a partir de la información extraída del programa Multi de la empresa Scania que se utiliza para el mantenimiento y diagnóstico de sus vehículos. Dentro del programa, los camiones son de las series P, G, R y T que se han ido desarrollando desde el 2003.

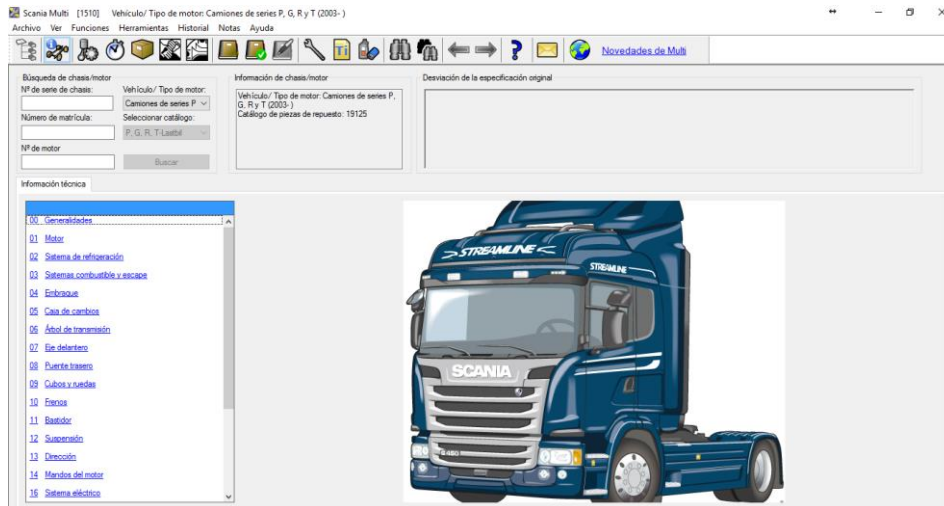


Figura 50. Imagen programa Multi de empresa Scania.

Primero se detallará brevemente el motor Diésel que se utilizará. Para ello se explicará, primero como se denominará el motor y segundo sus principales características:

1. La denominación es un código cuyo significado de cada elemento es el siguiente:

- Modelo:
 - DC: para motor Diésel con turbocompresor e intercooler enfriado por aire.
 - DI: para motor Diésel con turbocompresor e intercooler enfriado por agua.
 - U: universal (no vehículo).
- Cubicaje del cilindro (La cilindrada del motor expresada como un número entero):
 - 09: motor de 9 litros.
 - 13: motor de 13 litros.
- Código de prestaciones y homologación: Se indica por medio de tres dígitos del 001 al 999.
- Uso:
 - A: motor en general (no vehículo).
 - D: motor para camión, cabina de acceso bajo (reparto).
 - F: motor para autobús, montado en sentido longitudinal delante del eje delantero.
 - G: motor para vehículo híbrido (híbrido en paralelo).
 - H: motor para vehículo híbrido (funcionamiento en serie).

- L: motor para camión, aplicación general.
- M: motor marino (no vehículo).
- K: motor para autobús, montado en sentido longitudinal detrás del último eje.
- N: motor para autobús, montado en sentido transversal detrás del último eje.
- W: motor para camión, tracción integral.
- Variante: se indica por medio de dos dígitos del 01 al 99

En el caso que se ocupa; Es un modelo DC con un motor de 9 litros, al ser la primera homologación es el 001, su uso es para camión en general (L) y al ser la primera variante es el 01.

La denominación del motor del modelo es el: DC09 001L01

2. Las principales características del motor Diésel de 9 litros con XPI (Inyección de presión extra alta) y que dispone de cinco cilindros:

Tabla 8. Especificaciones del conjunto del motor.

Especificaciones del conjunto del motor	
Datos generales del motor	DC9
Diámetro de cilindro	130.0 mm
Carrera de pistón	140.0 mm
Cilindrada	9,29 litros
Nº de cojinetes de bancada	6
Orden de encendido	1-2-4-5-3
Relación de compresión	17:1
Sentido de giro (visto desde la parte trasera)	A izquierdas
Régimen del motor a ralentí bajo	600 rpm
Régimen del motor a ralentí máximo	2400 rpm
Volumen de aceite	31 litros
Peso total sin aceite ni agua	1,025 kg

8.1. Elementos y distribución

Los elementos por el cual pasará el gas hasta el motor son estos en orden y los últimos los tubos por el que pasa, la numeración de los elementos es la que se seguirá para hacer la parte práctica del trabajo:

1. Depósito GNL
2. Válvula solenoide del depósito
3. Válvula de corte manual, flujo de gas
4. Filtro de combustible
5. Manómetro
6. Sensor de presión del depósito
7. Regulador de la presión del gas
8. Válvula de seguridad del regulador de gas
9. Válvula solenoide de corte de gas, baja presión
10. Sensor de temperatura y presión del combustible en la rampa de combustible
11. Rampa de combustible
12. Inyectores
13. Tubo de alta presión
14. Tubo de baja presión

Se distribuyen según las imágenes de abajo:

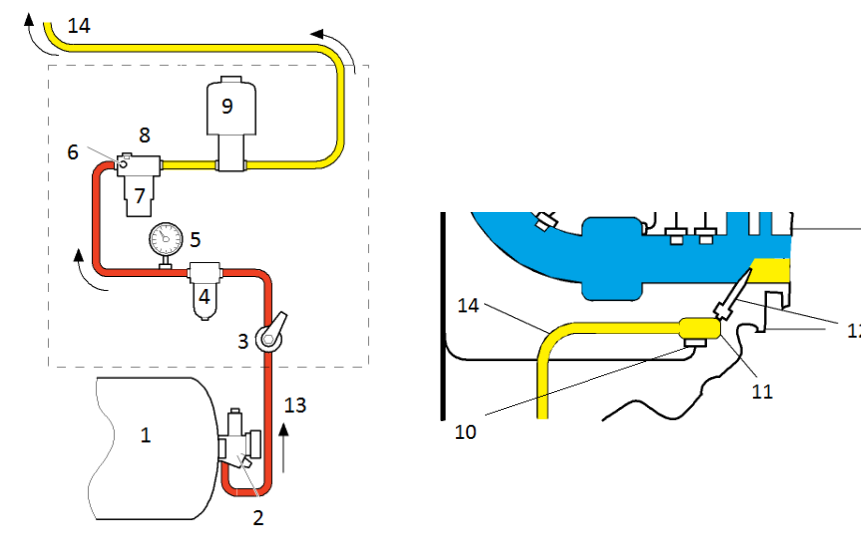


Figura 51. Elementos implicados.

El tubo rojo muestra el tubo donde viaja el gas desde los depósitos hasta el regulador de presión del gas con una presión máxima de 10 bar y el tubo amarillo muestra el tubo donde viaja el gas regulado a 7,3 bar desde el regulador hasta los inyectores del motor.

En la figura 51 a la derecha se puede ver el tubo azul por donde circularía aire y posteriormente se mezcla con el gas que es de color amarillo.

Los elementos en el camión están posicionados así:

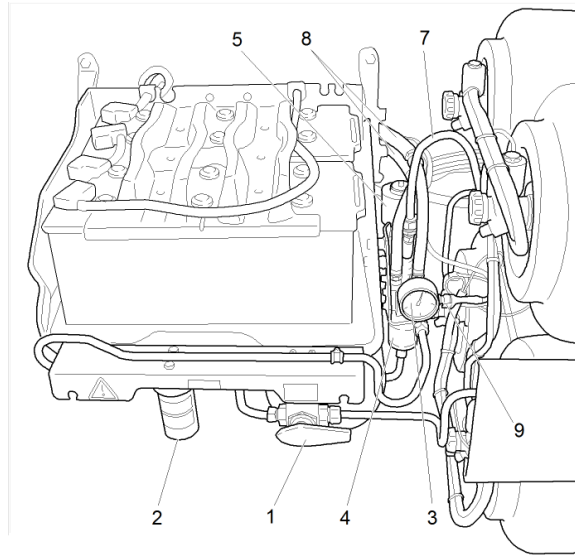


Figura 52. Posición de los elementos del camión.

1. Válvula de corte manual, flujo de gas
2. Filtro de combustible
3. Manómetro
4. Regulador de la presión del gas
5. Válvula solenoide de corte de gas, baja presión
6. Tubo de baja presión
7. Tubo de combustible de una válvula de seguridad por una presión alta (no se tiene en cuenta para el modelo)
8. Tubo de refrigerante (Para refrigerar el gas, no se tiene en cuenta para el modelo)
9. Sensor de presión del depósito

Existe una unidad combinada llamada panel de gas que corresponde a cuatro elementos donde abajo se puede ver su posición en el panel de gas y la posición de dicho panel de gas en el camión:

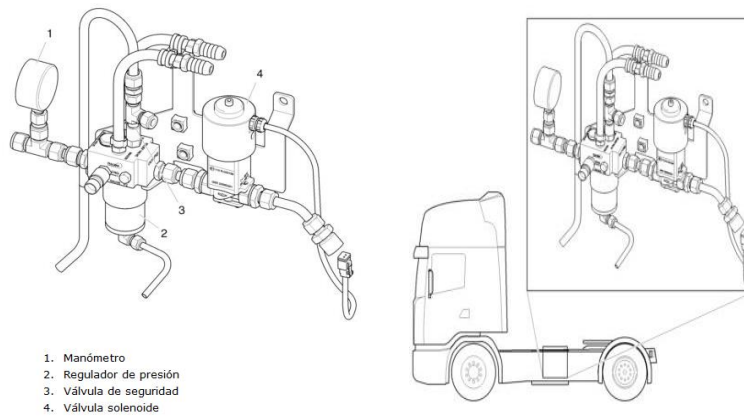


Figura 53. Panel de gas.

Seguidamente se explicará cada componente detalladamente:

8.1.1. Depósito GNL

Cada camión tiene dos depósitos de GNL que están situados a cada lado del bastidor. El depósito izquierdo tiene un volumen de 409 litros y el depósito derecho tiene un volumen de 319 litros.

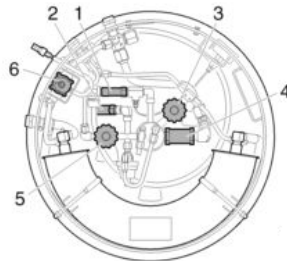


Figura 54. Imagen depósitos y bastidor.

Estas son las válvulas que contiene el depósito y como están distribuidas:

- Las válvulas de sobrepresión primaria y secundaria: impiden la sobrepresión en el depósito de gas. Si se sobrepasa en 16 bar se abre la válvula de sobrepresión primaria el cual descarga el gas a través de un tubo de descarga hacia la atmósfera. Si sobrepasa los 24 bar, por alguna razón, se abre la válvula de sobrepresión secundaria.
- Válvula de corte manual de combustible: se cierra manualmente para aislar el depósito del resto del circuito. En funcionamiento normal, la válvula está abierta.
- Válvula de corte del tubo: impide que el gas natural líquido salga del depósito de gas si se rompe la tubería del depósito.

- Válvula de corte manual de gas de retorno: se utiliza al rellenar un depósito de gas, en que estará abierta. Durante el funcionamiento normal, esta válvula está cerrada.
- Válvula solenoide: garantiza que el motor recibe combustible siempre que esté encendido. Esta válvula sí que se tendrá en cuenta para el modelo.



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

Figura 55. Distribución de válvulas.

Los depósitos de gas se componen de una carcasa de acero exterior y una pared interior de aislamiento. Entre ellas hay un espacio vacío para evitar que el gas líquido se caliente. Si la carcasa exterior resulta dañada, el depósito de gas perderá el aislamiento en la zona dañada y el gas se evaporará más rápidamente. Esta situación se detecta mediante una zona fría en el exterior del depósito.

Los depósitos de GNL están marcados con un símbolo en forma de diamante con el texto en siglas en inglés LNG como este:



Figura 56. Símbolo del depósito GNL.

Uno de los problemas de estos depósitos es cuando el vehículo está mucho tiempo parado ya que, sin la utilización de un refrigerante, el gas líquido se evapora al haberse elevado la temperatura. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un depósito lleno de GNL no inicia la evaporación del gas GNL hasta los 5 días siguientes.

Para el modelo se tendrá en cuenta el depósito con más volumen (409 litros). Al ser un cilindro, sus medidas exteriores serán de un radio de 280 mm y una longitud de 2350 mm para poder introducir los 409 litros máximos de gas y las capas de acero, el espacio vacío y la pared interior.

8.1.2. Válvula solenoide del depósito

Hay una válvula solenoide en la salida de cada depósito de GNL con la función de controlar la salida del gas. La válvula está abierta si está en funcionamiento el motor, pero se cierra si se apaga. Dicha válvula se abre a través de un relé en respuesta a una señal procedente de la unidad de mando del motor. Por seguridad, la válvula solenoide solo se puede abrir cuando la unidad de mando del motor recibe una señal de régimen del motor procedente de dicho motor. También se cierra si se activa un detector de colisión en el caso que el camión lo tenga equipado.

En las figuras 57 y 58 se pueden observar varias imágenes de la válvula y la descripción de sus partes:

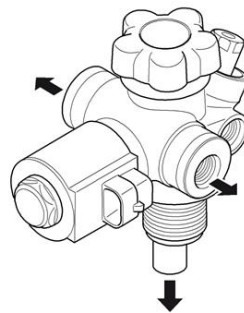
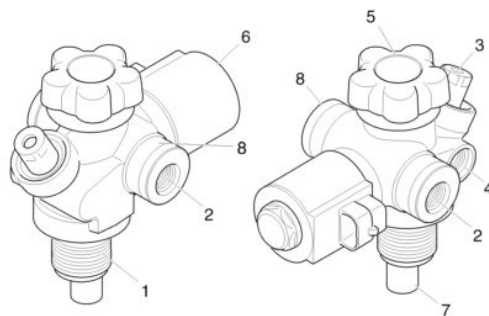


Figura 57. Válvula solenoide del depósito.



1. Acoplamiento de depósito
2. Tubo de combustible, tubería de alta presión
3. Válvula de rebose controlada por temperatura
4. Canal de drenaje si se activa la válvula de rebose controlada por temperatura
5. Llave de seguridad manual
6. Solenoide controlado a distancia
7. Válvula de rebose
8. Sistema de ventilación incorporado para microfugas

Figura 58. Partes de la válvula solenoide del depósito.

8.1.3. Válvula de corte manual

Si se actúa manualmente sobre ella, aísla el flujo de gas directamente al depósito. Se suelen usar cuando se realizan trabajos en los motores de gas, de modo que las tuberías entre los depósitos y el panel de gas también se vacían cuando se tiene el motor en marcha hasta que se para. En funcionamiento normal, la válvula está abierta y deja pasar el gas.

En la figura 59 se puede observar dos imágenes de la pieza:

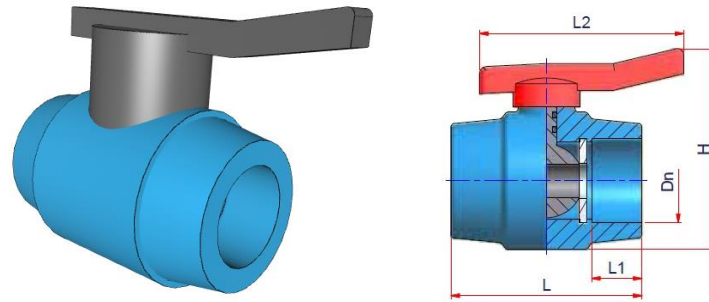


Figura 59. Válvula de corte manual.

8.1.4. Filtro del combustible

Consiste en limpiar y purificar el combustible gas. La unidad de filtrado es del tipo cartucho y lleva dos filtros de combustible.

Tiene una válvula de rebose que se abre aproximadamente a 26,2 bar o cuando el filtro está bloqueado, devolviendo el combustible al depósito.

Debajo se muestra cómo funciona el filtro y sus partes:

1. Admisión
2. Salida
3. Recirculación desde la rampa de combustible
4. Recirculación al depósito
5. Boquilla de purga
6. Válvula de rebose
7. Filtro

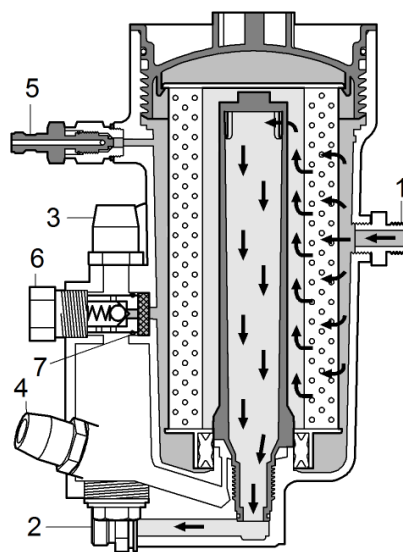


Figura 60. Filtro del combustible y sus partes.

8.1.5. Manómetro

Se utiliza para indicar la presión del gas en bar, es utilizado en caso de mantenimiento del sistema para tener una medida directa cuando se manipula. Mide la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica. Es decir, compara la presión atmosférica con la de dentro del circuito por donde circula el gas. Mide una presión relativa llamada presión manométrica. Este tipo de manómetro se llama manómetro de *Bourdon*. En la figura 61 nos muestra una imagen del manómetro y de su símbolo:

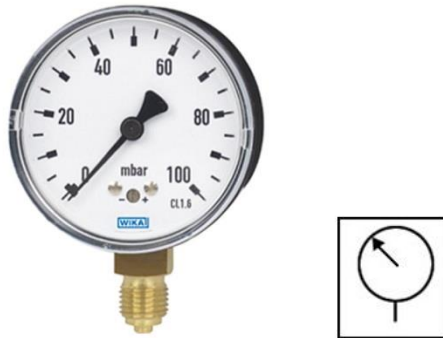


Figura 61. Manómetro.

8.1.6. Sensor de presión del depósito

Supervisa la presión del gas y transmite las señales al cuadro de instrumentos para mostrar la cantidad de gas en los depósitos. También se utiliza para detectar fugas de gas. La pieza está encaminada para informar al conductor de la situación del gas en el sistema. Su símbolo:

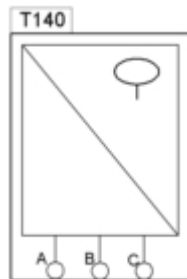


Figura 62. Sensor de presión del depósito.

8.1.7. Regulador de la presión del gas

En el regulador de presión reduce la presión del gas que proviene del depósito que es de 10 bar hasta los 7,3 bar por encima de la presión del colector de admisión que es el tubo de baja presión. Tiene la forma y trabaja de forma similar al regulador del sistema con GNC. Dispone de un refrigerante que es el refrigerante procedente del motor y que tiene unas temperaturas más elevadas que el gas, para calentar el gas y así pasar totalmente a estado gaseoso en la segunda parte del circuito hasta los inyectores.

8.1.8. Válvula de seguridad del regulador de gas

También llamadas válvulas de alivio de presión, se utilizan para aliviar la presión cuando un fluido supera un límite preestablecido. Se alivia mediante la evacuación al exterior del caudal de fluido necesario. Su objetivo es evitar la explosión del sistema o el fallo del equipo o de una tubería por un exceso de presión. Está situada después del regulador.

El dispositivo contiene un muelle que hace presión sobre el área de un disco de cierre, está presión es el límite del gas. Si la presión del gas supera este límite, hará que el muelle se encoja y moverá el disco de cierre, haciendo que el gas se escape al exterior. Las partes y el esquema del dispositivo:

1. Caperuza
2. Tensor
3. Contratuerca fijación-regulación
4. Precinto
5. Resorte
6. Vástago
7. Tapa guía
8. Disco de cierre u obturador
9. Tornillo de fijación del anillo de ajuste
10. Tobera de entrada
11. Palanca de apertura manual
12. Cúpula o arcada
13. Placas resorte
14. Cuerpo
15. Anillo de ajuste o regulación

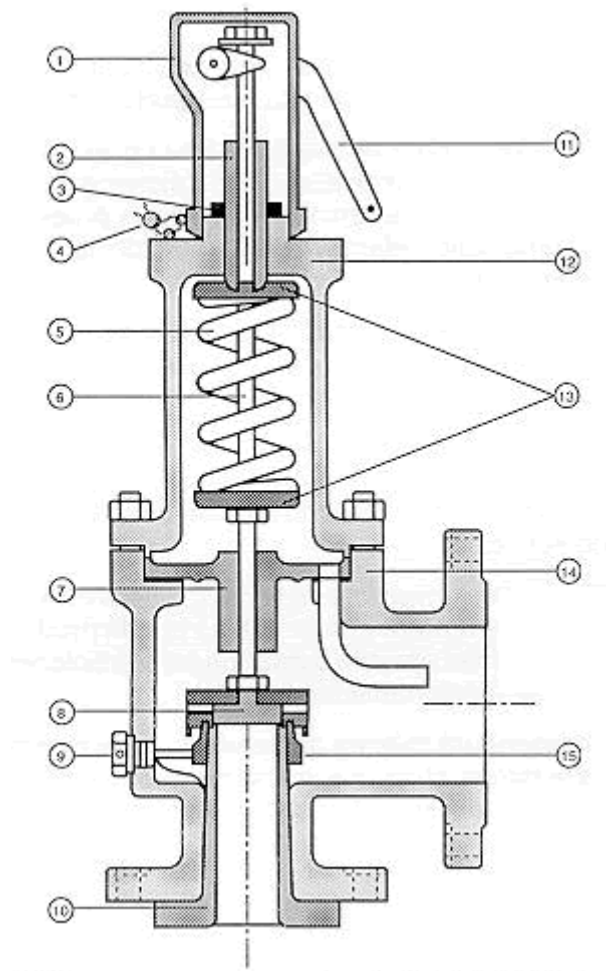


Figura 63. Válvula de seguridad del regulador de gas.

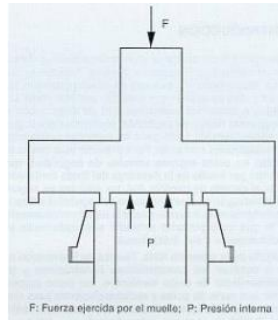


Figura 64. Imagen de la presión ejercida del fluido sobre el disco.

8.1.9. Válvula solenoide de corte de gas, baja presión

Hace la misma función que la otra válvula solenoide; cierra el flujo de gas del panel de gas cuando se para el motor y permite el flujo de gas de nuevo al arrancarlo.

Debajo se puede ver su forma y su símbolo:

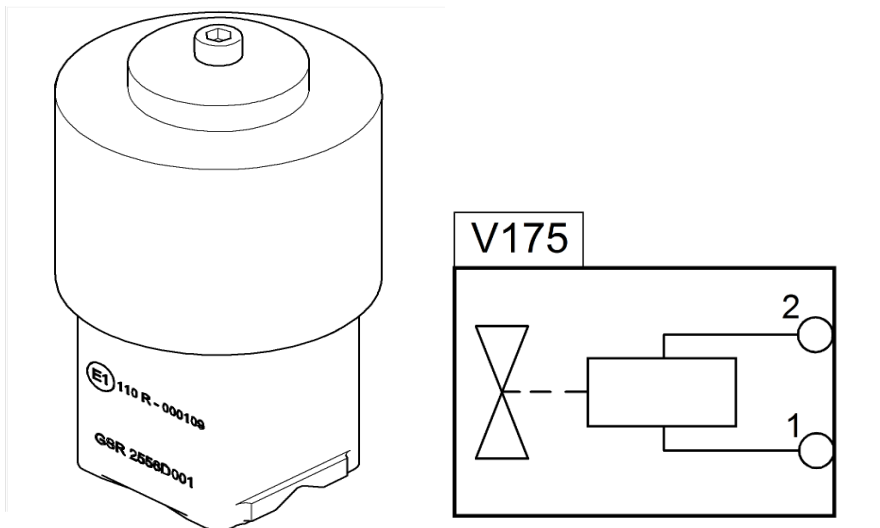


Figura 65. Válvula solenoide de corte de gas, baja presión.

8.1.10. Sensor de temperatura y presión del combustible en la rampa de combustible

El sensor mide la presión y la temperatura del gas en la rampa de combustible, está situado dentro de dicha rampa. La información se transmite a la unidad de mando del motor del motor de gas.

Debajo se puede ver su forma:

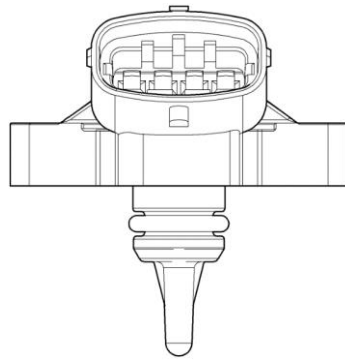


Figura 66. Sensor de temperatura y presión del combustible.

8.1.11. Rampa de combustible

Contiene y distribuye el gas a los diez inyectores. Es un tubo rígido por el cual llega por un lado el gas, este pasa por el sensor de temperatura y presión y posteriormente se distribuye por las 10 bifurcaciones que conducen a los 10 inyectores del sistema.

8.1.12. Inyectores

Los diez inyectores inyectan combustible gas directamente en el colector de admisión del motor. Cada cilindro se regula mediante dos inyectores situados en el colector. Se conectan eléctricamente en paralelo y se controlan por medio del sistema de control del motor. Si un inyector empieza a rendir menos se compensa con un mayor trabajo por el otro inyector.

El volumen de combustible que inyectan depende de la cantidad de aire que necesita el motor. En la entrada de los conductos de aire hay un sensor de flujo de aire que detecta la cantidad de aire que fluye hacia el motor. En los inyectores hay un solenoide que controla una válvula de aguja que regula el caudal de gas.

Cuando el motor está a ralentí y a regímenes bajos, el sensor de flujo de aire detecta que fluyen pequeñas cantidades de aire, porque la válvula de mariposa que está situada en el conducto de admisión del aire está casi cerrada. El sensor informa de este hecho al sistema de control del motor y este informa a los inyectores de que solo es necesario inyectar una pequeña cantidad de combustible.

En cambio, en la aceleración del camión, la mariposa se abre más y los sensores detectan un mayor flujo de aire. Este incremento se informa al sistema de control que manda a los inyectores que deben inyectar más cantidad de gas.

Debajo hay dos tipos de formas y su símbolo:

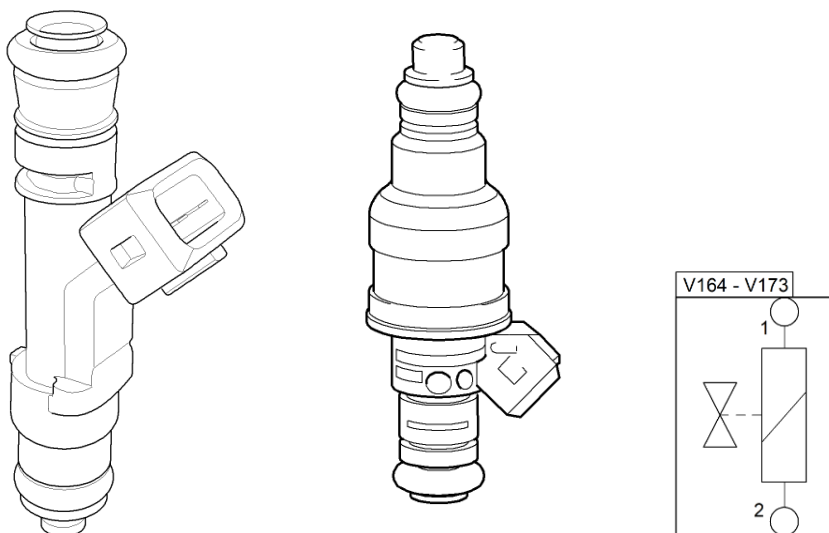


Figura 67. Inyectores y su símbolo.

8.1.13. Tubos de alta y baja presión

Las tuberías del depósito están tendidas a lo largo del bastidor y entre los depósitos de gas. Estas tuberías de gas están conectadas al panel de gas del vehículo y posteriormente une el panel con la rampa del combustible. Durante el recorrido el gas se va calentando, pasando a estado gaseoso. Las tuberías son flexibles y serán las mismas para la presión de 10 bar que para la presión de 7,6 bar por la poca variación en su presión. Para saber las medidas de las tuberías que serán necesarias, se ha utilizado los catálogos de la empresa SWAGELOK. Dentro de los catálogos, se ha mirado para tubos de acero inoxidable que soportarán la presión del gas. Se ha decidido esta medida del catálogo:

Tabla 4—Tubo de acero inoxidable sin soldadura métrico

Las presiones de servicio admisibles son calculadas con un valor S de 20 000 psi (137,8 MPa) para tubo EN ISO 1127 (tolerancia D4, T4 para tubo de 3 a 12 mm; tolerancia D4, T3 para tubo de 14 a 50 mm) a una temperatura entre -28 y 37°C (-20 y 100°F) tal y como se indica en ASME B31.3, y tubo ASTM A213 a una temperatura entre -28 y 37°C (-20 y 100°F) tal y como se indica en ASME B31.1 salvo excepciones.

Para tubo soldado

En el caso del tubo soldado y estirado, se debe aplicar un factor de corrección para mantener la integridad de la soldadura:

- para tubo con doble cordón de soldadura, multiplique la presión de servicio por 0,85.
- para tubo con un cordón de soldadura, multiplique la presión de servicio por 0,80.

Ø ext. del tubo mm	Espesor de pared del tubo, mm											Serie del racor Swagelok				
	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,5		4,0	4,5	5,0	
3	670															3MO
6	310	420	540	710												6MO
8		310	390	520												8MO
10		240	300	400	510	580										10MO
12		200	250	330	410	470										12MO
14		160	200	270	340	380	430									14MO
15		150	190	250	310	360	400									15MO
16			170	230	290	330	370	400 ¹⁾								16MO
18			150	200	260	290	320	370								18MO
20			140	180	230	260	290	330	380							20MO
22			140	180	230	260	300	340								22MO
25				180	200	230	260	290	320							25MO
28					180	200	230	260	280	330						28MO
30					170	180	210	240	260	310						30MO
32					160	170	200	220	240	290	330					32MO
38						140	160	190	200	240	270	310				38MO
50									150	180	210	240	270			50MO

¹⁾ Rango basado en pruebas de presión repetitivas sobre racores Swagelok con un factor de seguridad de 4:1, basado asimismo en fugas de fluido hidráulico.

Figura 68. Catálogo empresa SWAGELOK.

Con un diámetro exterior de 12 mm y un espesor de 1 mm, el tubo puede soportar una presión de hasta 200 bares (muy elevada comparado con la presión que puede llegar el GNL). No se ha elegido un diámetro mayor porque indica en el catálogo que no se utilicen las zonas sombreadas en el caso de ser gases. En el catálogo explica que cuanto más diámetro es más fácil que haya defectos superficiales. Estos defectos pueden provocar la escapada de las moléculas del gas.

Por esta razón se ha elegido un diámetro lo más pequeño posible y siguiendo la recomendación que se ha dado en la visita a la empresa *Evarm*.

CAPÍTULO 9:

PROGRAMA CATIA

CATIA es un PLM (Product Lyfecyle Management) que contiene más de cincuenta procesos en los ámbitos de diseño, fabricación y la ingeniería de sistemas. PLM se refiere a la gestión del ciclo de vida del producto, los software que lo contienen permiten gestionar el ciclo de una forma eficaz y económica desde la idea inicial, el diseño y la fabricación hasta el mantenimiento del producto y su eliminación. Se basa en la plataforma 3DEXPERIENCE de la empresa Dassault Systemes. Proporciona apoyo desde el diseño hasta la producción y el análisis de productos. En este trabajo se utiliza para el diseño o moldeo en 3D de los componentes, también llamado CAD (diseño asistido por ordenador).

Este programa ofrece estas características:

- El entorno de diseño social está basado en una única fuente de autenticidad. Para acceder a esta fuente, se accede mediante potentes paneles en 3D que impulsan la inteligencia empresarial, el diseño simultáneo en tiempo real y la colaboración de todas las partes interesadas.
- La plataforma 3DEXPERIENCE ofrece una experiencia intuitiva con funcionalidades de simulación y moldeo en 3D de primer nivel, que optimizan la eficacia de todos los usuarios tanto experimentados como esporádicos.
- Es una plataforma de desarrollo de productos que resulta fácil de integrar con los procesos y las herramientas existentes. Esto permite que varias disciplinas aprovechen las eficaces e integradas aplicaciones especializadas en todas las fases del proceso de desarrollo de los productos.

Dentro de la ingeniería mecánica, CATIA permite crear cualquier tipo de ensamblaje 3D para prácticamente todos los procesos de ingeniería mecánica. Se puede moldear piezas de fundición o forjadas, operaciones de moldeo e inyección de plástico, diseño y fabricación de piezas de materiales compuestos, diseño de piezas de chapa metálica y operaciones de cierre avanzadas. Por lo tanto, es útil para una amplia variedad de sectores y procesos.

CATIA tiene herramientas de modelaje que permiten definir un producto mecánico completo; incluidas las tolerancias funcionales, las anotaciones 3D y la cinemática. Los diseños mecánicos se pueden formar rápidamente al igual que los cambios en el moldeo en 3D.

Para el transporte y la movilidad, que es el tema que se ocupa en el trabajo, aprovecha CATIA la plataforma 3DEXPERIENCE para dar soluciones en la realización de:

- Diseños creativos.
- Modelado.
- Ingeniería y fabricación de compuestos.
- Diseño de chapas metálicas.
- Diseño de moldes y herramientas.
- Diseño eléctrico.
- Ingeniería de sistemas.

En el trabajo, para poder hacer las simulaciones se ha utilizado los dos sub-apartados de diseño mecánico llamados; diseño de la pieza y diseño del ensamblaje. En el diseño de la pieza se moldea la pieza y en el diseño del ensamblaje se unen las piezas:

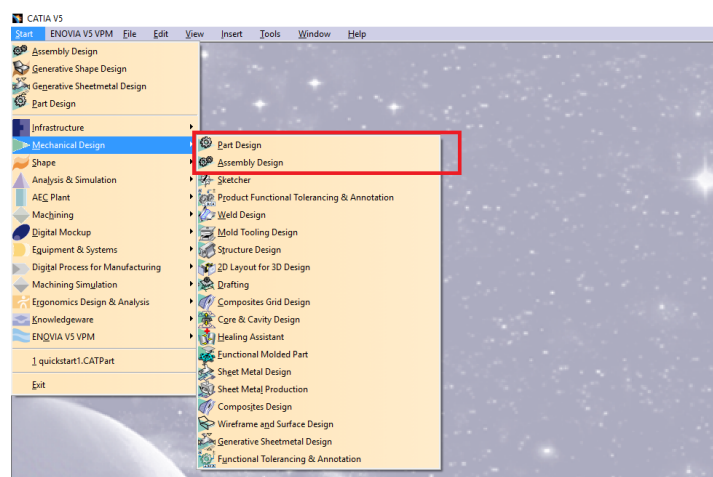


Figura 69. Sub-apartados de diseño mecánico.

Al entrar a diseñar una pieza o ensamblaje, se crea un árbol detallando las piezas, ensamblajes, restricciones de movimiento y las funciones del

programa LMS utilizadas. Se puede observar un ejemplo en la imagen de la figura 70 del árbol a partir del modelo que se explicará con más detalle:



Figura 70. Árbol generado a partir del modelo.

Dentro del espacio en 3D es importante el sistema de ejes predefinido por el programa. El programa dispone de dos sistemas de ejes con los mismos sentidos; uno pequeño en la parte debajo-derecha, y otro más grande y más útil en la parte arriba-derecha que se puede utilizar para moverse entre sus ejes. El de arriba es la imagen de la izquierda y el de abajo la de la derecha:

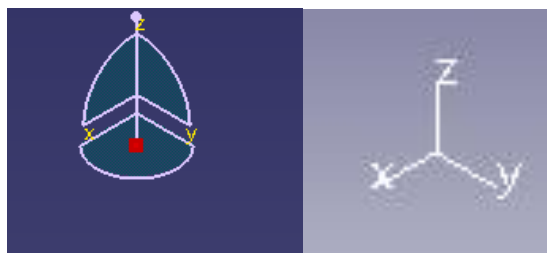


Figura 71. Sistemas de ejes.

9.1. Diseño en 2D

Para el diseño en 2D también se utiliza la plataforma 3DEXPERIENCE, pero es un programa especializado en hacer diseños en 3D.

De cara hacer las simulaciones, se ha utilizado diseños en 2D dentro del sub-apartado de "diseño de la pieza" formados por puntos y rectas porque son los elementos mínimos necesarios para que el programa embebido LMS SAMTECH TEA PIPE, que se explicará con más detalle en el próximo capítulo, pueda calcular y diseñar la forma de las tuberías. No es necesario moldear una pieza en 3D para que pueda crear los tubos, solamente se necesitan estos dos elementos en el inicio y final de la tubería.

En la figura 72 se observa un ejemplo utilizado para el dibujo de puntos y rectas:

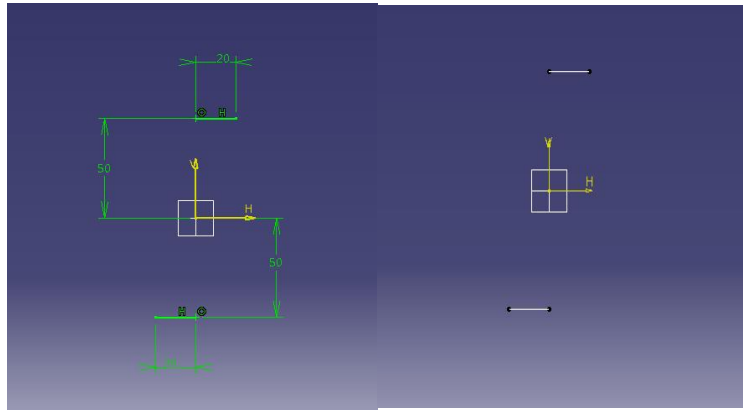


Figura 72. Ejemplo diseño 2D.

También se ha utilizado el diseño en 2D para poder crear planos que luego se utilizaran como base para extruir estos planos y que se conviertan en diseños en 3D. Con esta base, se han creado las piezas del modelo. Las herramientas que se han utilizado han sido estas, están indicadas arriba y a la derecha de las letras:

- A) Corner: para dibujar redondeos.
- B) Chamfer: para dibujar chaflanes.
- C) Trim: recortar líneas o formas geométricas dibujadas.
- D) Mirror: hacer espejos de formas geométricas dibujadas.
- E) Project 3D elements: para proyectar elementos en el plano que ya están hechos en 3D.
- F) Construction: dibujar elementos en construcción.
- G) Constraint: acotar los elementos.
- H) Exit workbench: salir del diseño en 2D.
- I) Profile: dibujar diferentes formas consecutivas (rectas, curvas, círculos, etc...).
- J) Rectangle: dibujar rectángulos.
- K) Circle: dibujar círculos.
- L) Line: dibujar líneas.
- M) Axis: diseño de ejes.
- N) Point: dibujar puntos de referencia.

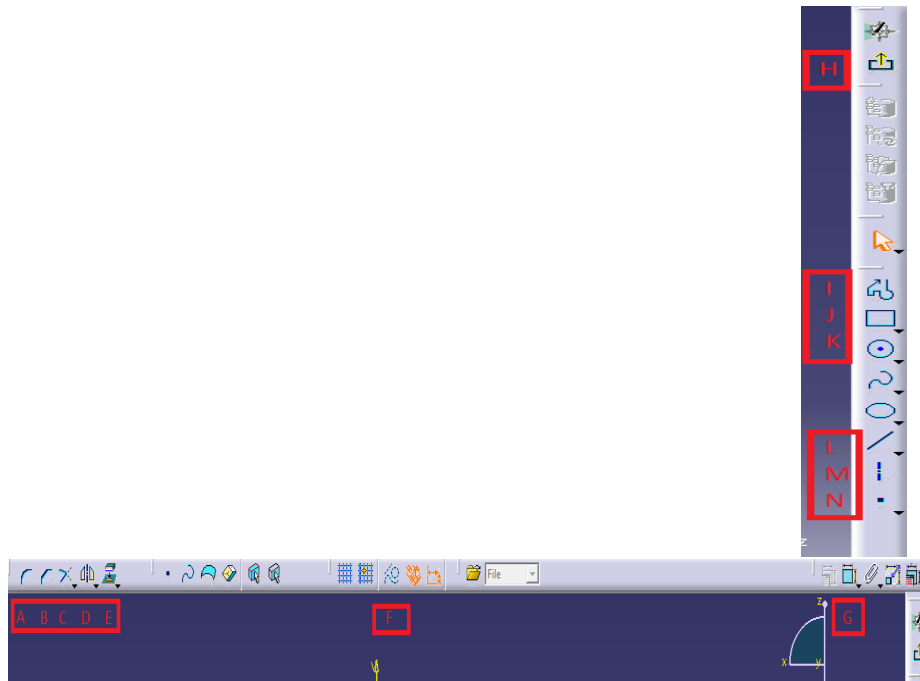


Figura 73. Herramientas diseño 2D.

9.2. Diseño en 3D

El diseño en 3D se basa también en la plataforma de experiencia empresarial llamada 3DEXPERIENCE. Está disponible en modo físico. Esta plataforma ofrece diferentes disciplinas:

- CATIA for Shape Design: para diseño industrial y automotriz.
- CATIA for Mechanical Design & Engineering: para diseño mecánico.
- CATIA for Systems Engineering: para diseño electrónico.
- CATIA for Equipment Design: para diseño de equipos y tuberías.
- CATIA Knowledge: para soluciones basadas en conocimiento.
- CATIA Analysis: para análisis estructural.

Dentro de estas disciplinas, el programa tiene muchas sub-disciplinas que permiten una multitud de funcionalidades.

Después de moldear un dibujo geométrico en un plano 2D, se utilizan herramientas como la extrusión o el hueco para pasar a ser un dibujo en 3D. Las herramientas utilizadas para el diseño en 3D de las piezas son las siguientes. Están arriba, a la derecha y debajo de las letras:

- A) Edged fillet: redondeo de un borde.
- B) Mirror: espejo de elementos en 3D.
- C) Rectangular pattern: hacer matrices de piezas en 3D.

- D) Plane: creación de planos.
- E) Sketch: para pasar hacer un dibujo en 2D sobre un plano.
- F) Pad: extrusión de un plano en 2D.
- G) Pocket: hacer un hueco o agujero en un plano en 2D.
- H) Shaft: hacer una forma geométrica alrededor de un eje.
- I) Herramientas de visualización: para ver la pieza desde diferentes perspectivas.
- J) Axis system: creación de sistemas de ejes.
- K) Update: actualizar las funciones introducidas.

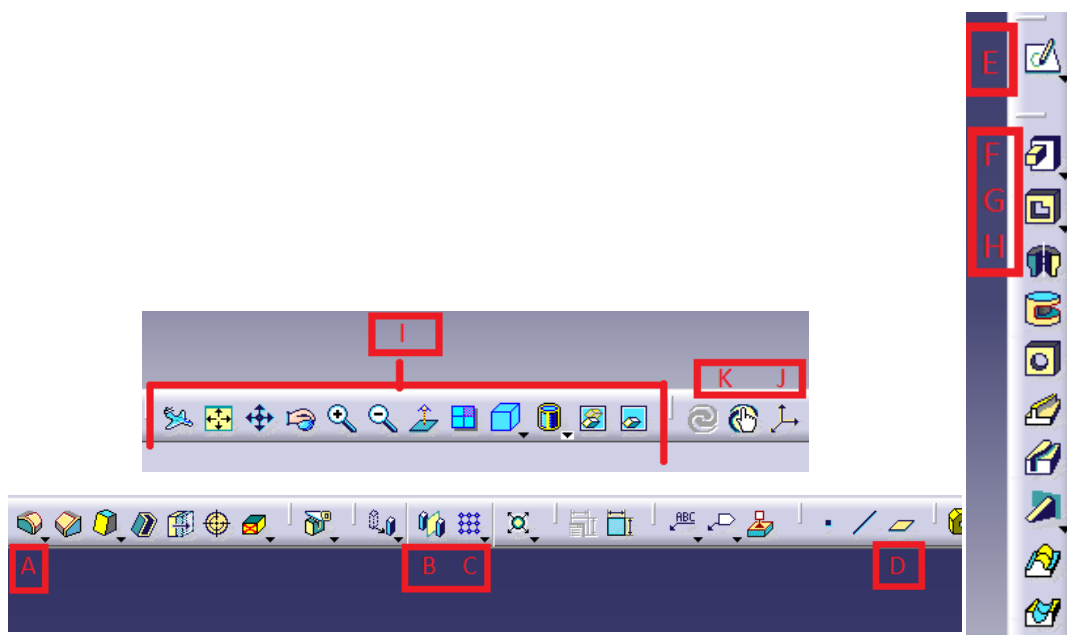


Figura 74. Herramientas diseño 3D.

Además, se han ensamblado algunas piezas que serán explicadas más adelante. Dentro del diseño de ensamblaje de las piezas, se han utilizado las siguientes herramientas:

- En la pestaña "Edit->Move": se han movido las piezas introducidas en el espacio.
- Dentro de la pestaña "Insert": se han utilizado estas funciones para restringir el movimiento de las piezas y así unir las.

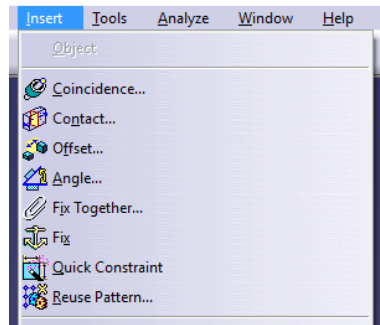


Figura 75. Funciones de restricción del movimiento.

- También dentro de la pestaña "Insert": existe las opciones de introducir las piezas para hacer el ensamblaje.

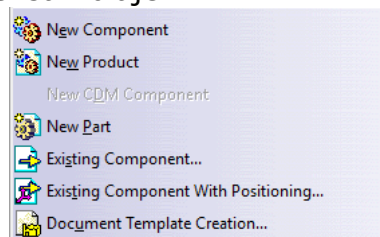


Figura 76. Funciones para introducir las piezas.

A partir de estas funciones y de la opción Update, antes explicada, se han ido uniendo las piezas necesarias.

9.3. Piezas diseñadas

Estas son las piezas que se han diseñado con el programa con su numeración elegida para hacer el modelo que se utilizará en las simulaciones con el programa LMS SAMTECH. En las piezas se han dibujado puntos y líneas extras que serán utilizadas posteriormente en el moldeo de las tuberías:

1. Depósito GNL

Se utilizará un depósito para el modelo en vez de dos. Este depósito tiene una capacidad máxima de 409 litros y para cubrir esta cantidad se ha elegido un radio de 280 mm y una longitud de 2350 mm.

En el interior del depósito se han dibujado las dos capas; de la carcasa de acero exterior y la pared interior de aislamiento, y el espacio vacío que hay entre ellas. En la salida del gas se ha dibujado un saliente para poder unir la siguiente pieza que es la válvula solenoide del depósito. No se ha dibujado la válvula para cargar el depósito porque no pertenece al modelo.

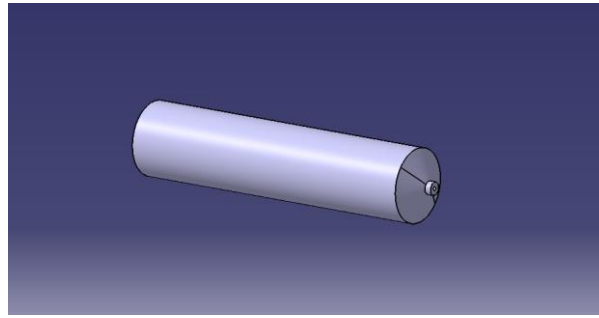


Figura 77. Diseño del depósito GNL.

2. Válvula solenoide o del depósito.

La válvula estará unida al depósito mediante un ensamblaje que será explicado más adelante. Se ha intentado diseñar con la máxima similitud a la válvula solenoide explicada anteriormente. Se ha diseñado el agujero de la tubería por donde circularía el gas. Por dentro estaría situada la válvula. También se ha diseñado la válvula de rebose por donde saldría el gas si hay una variación de temperatura, la llave de seguridad manual y el solenoide done tendría incorporado el relé.

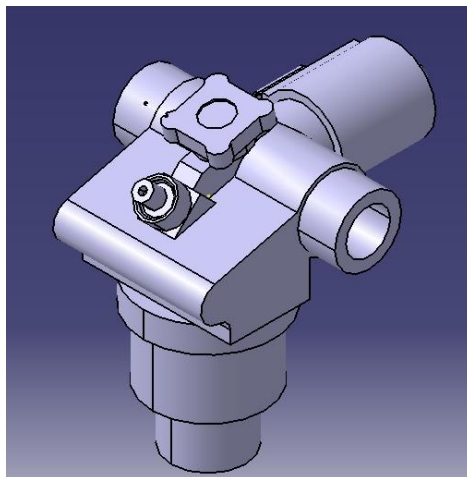


Figura 78. Diseño de la válvula solenoide o del depósito.

3. Válvula de corte manual

El diseño de la pieza se ha introducido a partir del CAD de la página web: <http://www.tracepartsonline.net>. Proviene de la empresa "Nupi Industrie Italiane" y se ha aumentado el grosor suficiente para que el diámetro interior sea de 12 mm.

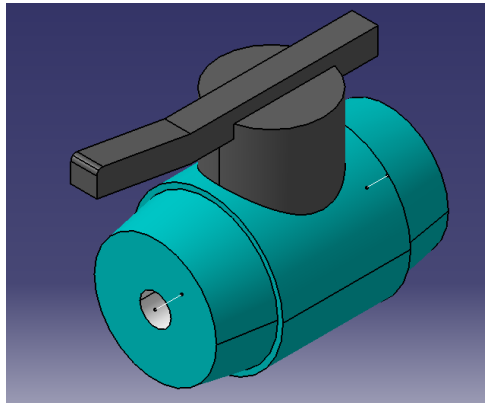


Figura 79. Diseño de la válvula de corte manual.

4. Filtro de combustible

El diseño del filtro se ha simplificado y está compuesto por un cubo donde dentro tiene dos capas de filtro del combustible. Con dos salientes donde entrará y saldrá el tubo del gas.

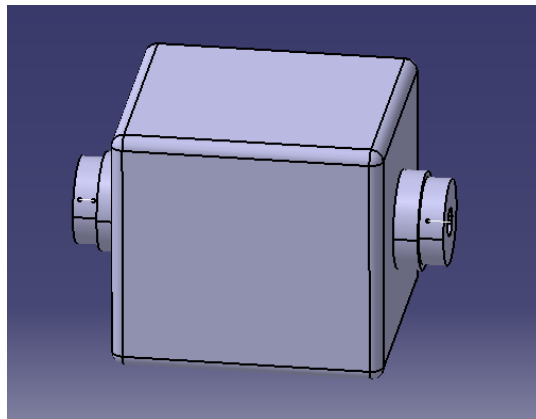


Figura 80. Diseño del filtro combustible.

5. Manómetro

Se ha intentado diseñar el manómetro con la máxima similitud a la realidad.

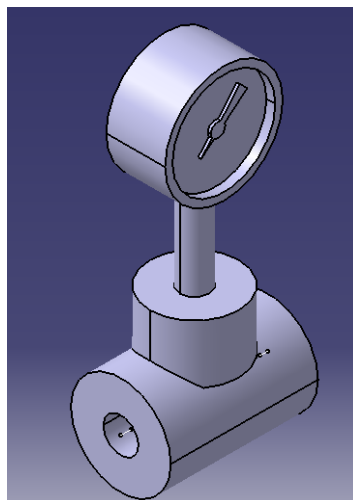


Figura 81. Diseño del manómetro.

6. Sensor de presión del depósito

Se ha diseñado el sensor con un saliente (donde ya está dentro el cable dibujado hacia arriba) para poder conectar un cable que enviaría señales para informar de la presión al cuadro de instrumentos del conductor.

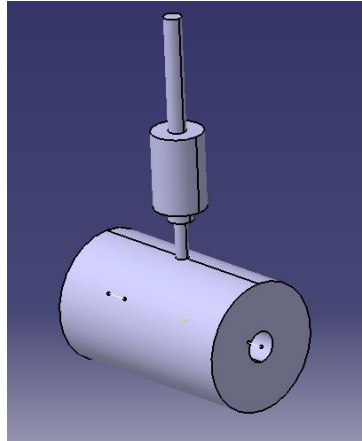


Figura 82. Diseño del sensor de presión del depósito.

7. Regulador de la presión del gas

Se ha utilizado un diseño parecido al regulador de gas del apartado del motor Dual-Fuel con GNC. El gas entraría por la parte derecha de la imagen del regulador en el saliente de arriba y saldría por el saliente de abajo. En la parte de arriba tiene dos salientes para que pudieran entrar y salir las tuberías del refrigerante. En la parte izquierda tiene diseñada una válvula de regulación que está conectada con la electrónica del motor para regular la presión.

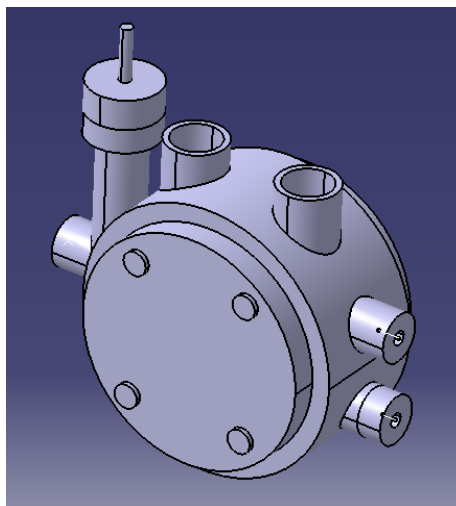


Figura 83. Diseño del regulador de la presión del gas.

8. Válvula de seguridad del regulador de gas

El gas entra por la parte de debajo de la pieza y saldría por el saliente del lado derecho. Se ha simplificado el diseño de la pieza y se ha dibujado la

parte donde dentro está el muelle con el disco de cierre. También se ha diseñado la palanca de apertura manual.

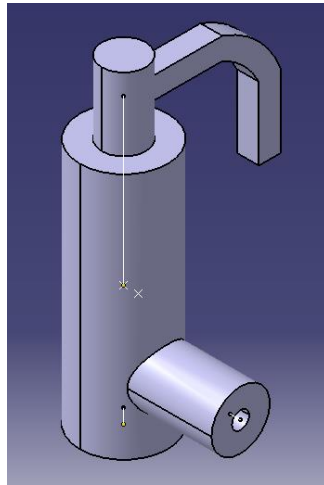


Figura 84. Diseño de la válvula de seguridad del regulador de gas.

9. Válvula solenoide de corte de gas, baja presión

La pieza es similar al explicado en el capítulo del motor Dual-Fuel con GNL, pero su diseño es más simplificado comparado con la otra válvula. Solamente tiene la válvula de corte del gas y el relé que lo activa, con un saliente donde iría conectado el cable que iría conectado a la electrónica del sistema.

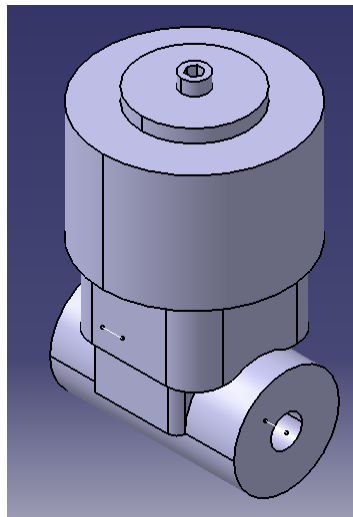


Figura 85. Diseño de la válvula solenoide de corte de gas, baja presión.

10. (10 y 11) Sensor de temperatura y presión del combustible en la rampa del combustible y rampa de combustible

El sensor está unido a la rampa del combustible. Este sensor se ha hecho con un diseño similar al sensor del depósito.

La rampa del combustible es un tubo rígido con la suficiente longitud para poder incluir los diez inyectores separados de dos en dos. Para eso, se han dibujado diez salientes para poder unir cada saliente a un inyector.

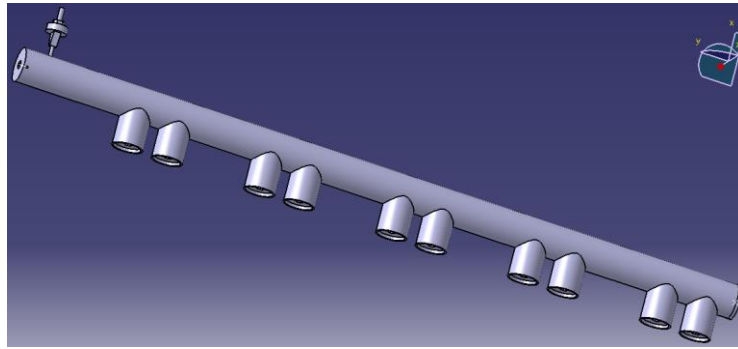


Figura 86. Diseño del sensor de temperatura y presión y rampa de combustible.

11. (12) Inyectores

Se ha diseñado para poder unir la rampa de combustible con los colectores de admisión. Tienen un saliente para poder conectarse eléctricamente y electrónicamente al sistema Dual-Fuel del motor y así insertar o no el gas dentro del colector mediante la válvula de aguja que dispone al final del inyector.

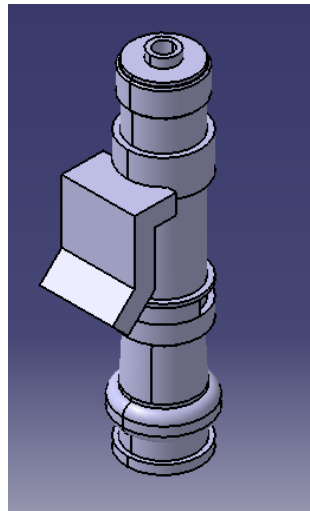


Figura 87. Diseño del inyector.

9.4. Piezas ensambladas

Se han ensamblado o unido dos grupos de piezas porque éstas piezas están unidas por una unión fija, no por la unión mediante tuberías. Estos grupos son:

- Grupo I: el depósito con la válvula solenoide del depósito. La válvula está unida en la salida del GNL del depósito mediante soldadura:

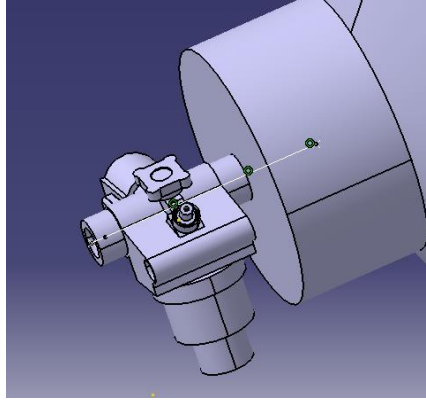


Figura 88. Unión grupo I.

- Grupo II: dentro del tubo de la rampa de combustible tendrán los ensamblajes del sensor de temperatura y de presión y posteriormente la unión de los diez inyectores. En el tubo de la rampa se hace un agujero para poder unir el sensor mediante la fijación de la soldadura y también hay diez agujeros en los salientes de la rampa para poder unir los inyectores mediante un acople con arandela y soldadura.

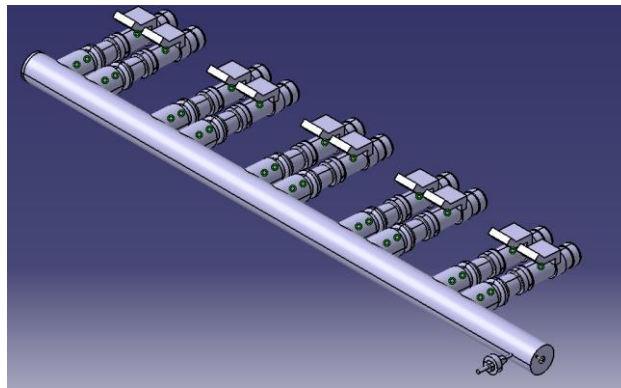


Figura 89. Unión grupo II.

CAPÍTULO 10:

PROGRAMA LMS

SAMTECH TEA PIPE

TEA PIPE es un producto profesional y un potente software con la utilidad de que los ingenieros y diseñadores mecánicos puedan realizar un análisis avanzado mecánico no lineal mediante la simulación de tubos (tubos flexibles y tuberías de aire/agua), mangueras y cables, todo esto embebido del programa CATIA. En resumen, simula el comportamiento mecánico de las tuberías. Con este programa se puede resolver algunas características básicas de los tubos como puede ser su curvatura, el número de conectores y soportes, la detección de posibles colisiones... Por ejemplo, se puede encontrar la longitud óptima, las posiciones y orientaciones del conector durante la comprobación de colisiones y curvaturas. También se utiliza para moldear diferentes tipos de tubos flexibles como pueden ser los cables de los frenos o dirección, o los cables de la caja de cambios e incluso los de los cables eléctricos. Y exportar tubos deformados para crear una nueva forma de tubo y realizar un análisis posterior.

Además, el programa tiene una base de datos del fabricante de los tubos para definir el comportamiento del material. También a partir de los modelos de CAD se definen las uniones de los tubos.

Este programa tiene dos tipos de estrategias:

- Simulación: se definen los parámetros de la tubería (como la longitud, diámetro, espesor, material, etc...) y entonces se vincula a unas configuraciones cinemáticas predeterminadas de los automóviles que tiene importadas el programa o que se pueden introducir. Con esto, TEA PIPE calcula la forma deformada, las curvaturas, los esfuerzos y las

colisiones a partir de la información de las configuraciones. Las simulaciones se pueden hacer con cargas casi estáticas o dinámicas y se puede aplicar a un conjunto de tubos.

- Optimización: se han de introducir cuales son las variables del diseño, las restricciones del diseño y se ha de elegir cual es la función objetivo que podría ser de longitud mínima o de máxima seguridad. A partir de estos datos, el programa realiza un estudio paramétrico o una optimización real, proponiendo al diseñador, un posible diseño óptimo para el tubo. Por ejemplo; la posición y orientación de los conectores y la longitud de la tubería.

Una aplicación similar a la estrategia de simulación es que realiza simulaciones a partir de mallas de los tubos que están revestidos por diversas capas para poder ver sus deformaciones, desplazamientos o sus pandeos.

Algunas de las ventajas o beneficios que tiene este programa:

- Se puede producir modelos flexibles de forma rápida y se puede crear tuberías de aire/agua mediante la adición de características específicas de un modelo de tubería que haya sido construido previamente en CATIA.
- Se utiliza una única interfaz de usuario para la definición de la geometría, en la definición de datos de análisis mecánico, el mallado, la puesta en marcha del solucionador y el post-procesamiento.
- TEA PIPE está dentro de SAMTECH que tiene 40 años de experiencia en ingeniería de calidad y software y tiene aplicaciones internas muy avanzadas e innovadoras.
- Se realizan simulaciones mecánicas de alto nivel dentro de un software CAE completo e integrado para el diseño mecánico.
- Se utiliza un software de alta calidad capaz de aumentar su fiabilidad del producto mediante la eliminación de iteraciones que son inasequibles durante el proceso de diseño.
- Con este programa se trabaja con mayor eficiencia, para así ahorrar tiempo y dinero. Evitar los largos y costosos ensayos y métodos de error con tal de proporcionar la forma óptima para la tubería para ser reutilizada en una descripción global de vehículos.
- Reducir la duración del ciclo de diseño y los costes relacionados con el diseño de tuberías.
- Aumentar la fiabilidad del producto y disminuir los costes debido a mantenimiento y garantía.

El programa tiene un motor de cálculo interno para poder resolver los problemas mecánicos no lineales llamado SAMCEF Mecano. Este motor proporciona soluciones para los siguientes problemas físicos:

- Respuestas estáticas: calcula los desplazamientos, las tensiones asociadas y fuerzas debidas al incremento de carga estática (la inercia y los efectos de la velocidad son ignorados).
- Respuestas cinemáticas: calcula los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones asociadas con una carga que depende del tiempo (no hay efectos de inercia).
- Respuestas dinámicas: la determinación del movimiento y de las tensiones dentro de un sistema estructural o mecánico (incluyendo efectos de inercia) que está sometido a una carga que depende del tiempo o a un movimiento forzado con grados de libertad (está prescrita la posición, velocidad y aceleración).

La formulación de las ecuaciones de movimiento incluye las contribuciones de las restricciones cinemáticas, elásticas, plásticas, de amortiguación o de fricción en las fuerzas internas, permitiendo la combinación de análisis estático, análisis dinámico o análisis cinemático. SAMCEF Mecano permite cambiar y reiniciar el análisis de las resoluciones desde cualquier punto.

10.1. Pre-simulación

El programa no necesita las piezas antes diseñadas para poder hacer las simulaciones. La geometría necesaria está compuesta de puntos y líneas o sistemas de ejes. Los puntos son para representar las salidas y las entradas de los tubos y las líneas para indicar sus direcciones. Los sistemas de ejes hacen esta doble función directamente.

Por eso, lo primero que se va hacer, es utilizar el diseño de la pieza dos (válvula solenoide del depósito) para crear los puntos que representarán las posiciones de las piezas en el espacio y la creación de otros puntos para indicar la entrada y salida de los tubos de las piezas. A partir de que el punto de final de la pieza dos tiene coordenadas (0,0,0) teniendo en cuenta la composición de coordenadas (X,Y,Z) en milímetros, se definirán los demás puntos a partir de los puntos finales de la pieza anterior. Por ejemplo, la tercera pieza estará su punto inicial en el punto (600, -700, 0) con respecto a la segunda pieza que está su punto final en el punto (0,0,0). Cada vez que se defina un punto inicial de una pieza, la pieza anterior a esta tendrá su punto final con coordenadas (0,0,0).

En el programa se diseñará mediante la función de definición de un punto, donde se indicará; las coordenadas, el punto de referencia que es el punto final de la pieza anterior y un sistema de ejes que se ha creado en el punto final de la pieza dos que será el mismo para todos los puntos y que tiene sus tres ejes con los mismos sentidos que el sistema de ejes de referencia del programa. En la figura 90 se puede observar en la imagen la función de definición del punto inicial de la tercera pieza y como el programa crea el punto a partir de los datos introducidos:

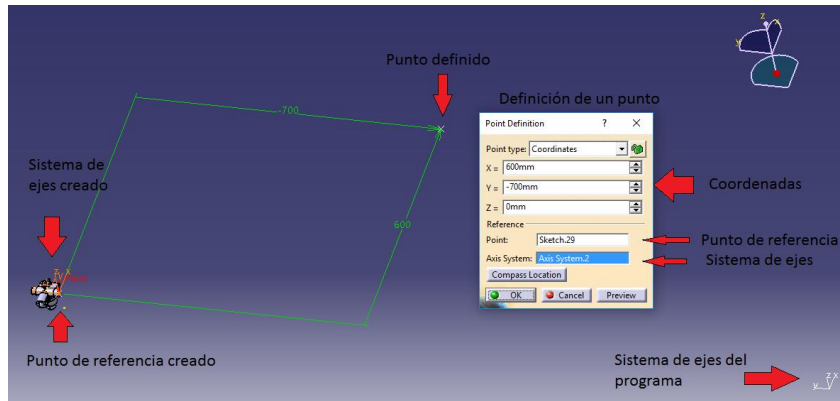


Figura 90. Definición de un punto.

A partir del punto inicial de la tercera pieza y de su longitud que es de 89 mm, se dibuja de la misma forma el segundo punto de dicha pieza que está en el punto (689, -700, 0) con respecto al punto final de la segunda pieza. Este segundo punto será el punto final de esta tercera pieza.

Utilizando este formato se dibujan los demás puntos iniciales de cada pieza con las siguientes coordenadas respecto al punto final de cada una:

- Punto inicial de la pieza 3 respecto al punto final de la pieza 2: (600, -700, 0)
- Punto inicial de la pieza 4 respecto al punto final de la pieza 3: (100, 450, -175)
- Punto inicial de la pieza 5 respecto al punto final de la pieza 4: (1050, -780, 500)
- Punto inicial de la pieza 6 respecto al punto final de la pieza 5: (-1050, -470, 500)
- Punto inicial de la pieza 7 respecto al punto final de la pieza 6: (200, -250, 150)
- Punto inicial de la pieza 8 respecto al punto final de la pieza 7: (570, -790, -110)
- Punto inicial de la pieza 9 respecto al punto final de la pieza 8: (-2360, -390, -580)
- Punto inicial de la pieza 10 respecto al punto final de la pieza 9: (710, -340, 320)

Y para dibujar el punto final de cada pieza hay que tener en cuenta las longitudes de cada pieza. También sirven para orientar la pieza. Las longitudes son las siguientes:

- Pieza 2: el punto final es el (0,0,0), su punto inicial está en el punto (0,60,0) ya que tiene una longitud de 60 mm en el eje Y.
- Pieza 3: 89 mm en el eje X.

- Pieza 4: 150 mm en el eje X.
- Pieza 5: -50 mm en el eje Y.
- Pieza 6: -80 mm en el eje Y.
- Pieza 7: -70 mm en el eje Z.
- Pieza 8: -80 mm en el eje Y, 42,5mm en el eje Z.
- Pieza 9: -70 mm en el eje Y.
- Pieza 10: el punto final para solo orientar la pieza es de -1085 mm en el eje Y.

Después de dibujar todos los puntos, se puede ver debajo como quedarían los puntos de inicio y final de cada pieza en vista isométrica. La imagen está realizada con el archivo del ensamblaje de las piezas 1 y 2:

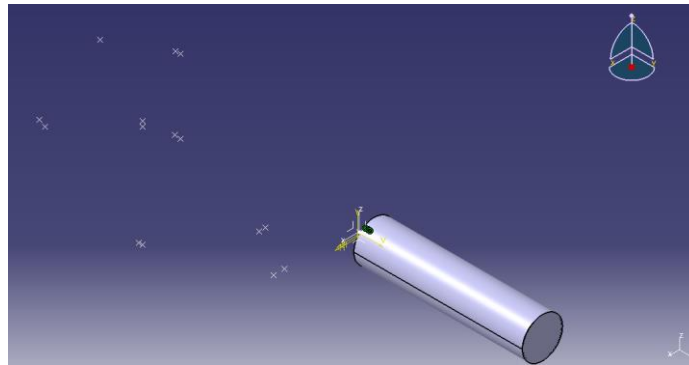


Figura 91. Puntos de inicio y final.

Seguidamente, se añaden las piezas en sus respectivos puntos mediante el ensamblaje (assembly design). Antes en los diseños de las piezas se han añadido puntos para que pudieran coincidir con los puntos explicados anteriormente, también se han añadido puntos extras en algunas piezas para acabar de orientarlas bien en su posición. Dentro del ensamblaje, se une cada punto dibujado en el espacio con sus respectivos puntos dibujados en la pieza mediante la restricción de movimiento llamado coincidencia (coincidence), para así poder situar cada pieza en su lugar y con su orientación.

Al unir todos los puntos iniciales y finales, con el ensamblaje de todas las piezas colocadas se obtiene la figura 92:

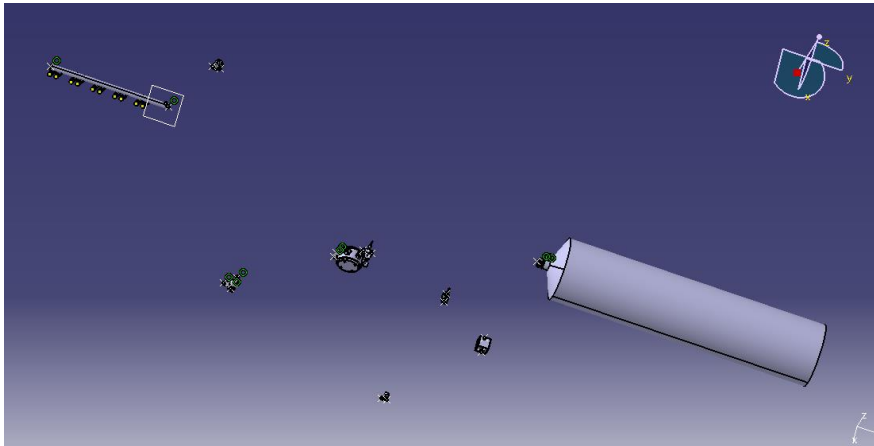


Figura 92. Ensamblaje de todas las piezas.

Lo último que falta como previo a usar las aplicaciones del LMS, es dibujar los puntos donde empezarán y acabarán cada tubo y que serán utilizados como conectores. Como norma general, se dibujará un punto intermedio entre los puntos iniciales y finales de cada pieza, excepto la pieza inicial y la final. Estos puntos coincidirán con el final de la tubería y el comienzo de la siguiente. Los puntos se dibujarán también en el diseño de la pieza 2. Los puntos son estos:

- Ensamblaje de las piezas 1 y 2: desde el punto $(0,0,0)$ se ha puesto un punto en $(0,90,0)$ que pertenece al interior de la pieza 1.
- Pieza 3: teniendo en cuenta que el punto está en la mitad de la longitud de la pieza, dicho punto está en $(644,5, -700, 0)$ respecto al punto final de la pieza 2.
- Pieza 4: teniendo en cuenta que el punto está en la mitad de la longitud de la pieza, dicho punto está en $(175, 450, -175)$ respecto al punto final de la pieza 3.
- Pieza 5: teniendo en cuenta que el punto está en la mitad de la longitud de la pieza, dicho punto está en $(1050, -805, 500)$ respecto al punto final de la pieza 4.
- Pieza 6: teniendo en cuenta que el punto está en la mitad de la longitud de la pieza, dicho punto está en $(-1050, -510, 500)$ respecto al punto final de la pieza 5.
- Pieza 7: en este caso la entrada y salida están en dos posiciones diferentes. Pero tanto en el punto de entrada como de salida del tubo, se hará un punto a -30 en el eje Y a cada uno con referencia al punto de entrada y de salida de la pieza 7.
- Pieza 8: el punto está en la mitad entre el entrante y saliente de la pieza, dicho punto está en $(570, -870, -67,5)$ respecto al punto final de la pieza 7.

- Pieza 9: teniendo en cuenta que el punto está en la mitad de la longitud de la pieza, dicho punto está en (-2360, -460, -580) respecto al punto final de la pieza 8.
- Ensamblajes de las piezas 10, 11 y 12: a partir del punto inicial de la pieza 10, que es (710, -340, 320), se ha puesto un punto a -30 en el eje Y que estará en (710, -370, 320) respecto al punto final de la pieza 9. El punto está antes de llegar al sensor de temperatura y presión, y que será el final del recorrido de las tuberías.

Entre estos puntos se dibujarán líneas para orientar el sentido de las tuberías.

A partir de aquí ya se puede utilizar las herramientas y paneles del programa LMS.

10.2. Paneles utilizados en la simulación

Los paneles o herramientas utilizados en la simulación se van a dividir en; opciones generales, los paneles que se utilizan en el diseño de la pieza (part design) y los paneles que se utilizan en el diseño de ensamblaje (assembly design).

Las opciones generales se acceden desde Tools->Options->Infrastructure->Part Infrastructure ->Pestaña de Tea Pipe. Algunas de estas opciones se han de definir antes de utilizar los otros comandos del LMS.

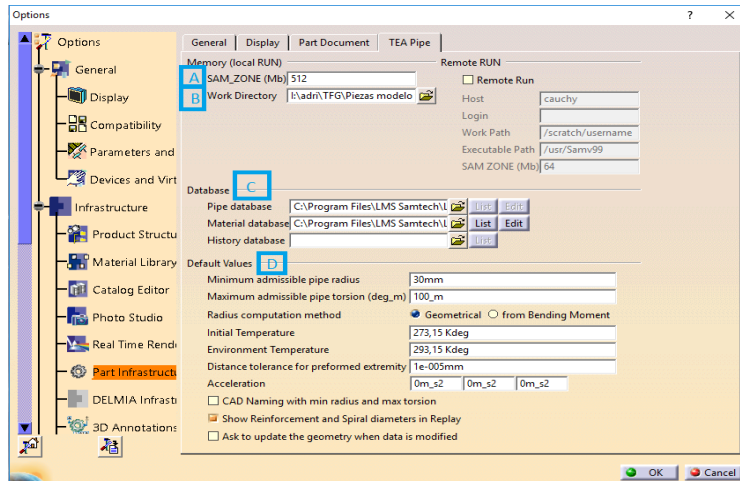


Figura 93. Panel de opción general.

Las opciones son las siguientes:

- A) SAM_ZONE: la memoria en Mb asignada para hacer las computaciones.
- B) Work Directory: la carpeta donde se pondrán los resultados de las computaciones. Es una opción opcional, no es necesaria tener indicada una carpeta.

- C) Database: las bases de datos de tuberías y materiales a utilizar. Se utilizarán las opciones de Pipe y Material database. El programa tiene una base de datos de materiales posibles para las tuberías en cada opción. Se utilizarán ambas que están en formato txt.
- D) Default values: son valores predeterminados del programa, los cuales no se modificarán para hacer las simulaciones.

Dentro del diseño de las piezas se utiliza el comando de "Create Pipe" que se utiliza para la creación de un tubo.

En "Create pipe" hay cinco pestañas de las cuales solo "Pipe definition" es obligatoria, las demás son opcionales. Estas son:

- General data: son los datos generales y es opcional. Se utiliza para poner el nombre del tubo, para definir una aceleración cinemática o dinámica o para introducir una malla al tubo.
- Preformed Pipe Definition: solo se utiliza si la configuración de la tubería está preformada, normalmente por un eje. Es opcional.
- History definition: esta página permite personalizar el orden de los pasos en la creación de la tubería. Es opcional.
- Collisions: está página permite la selección de las superficies contra las cuales deben comprobarse las distancias. Es opcional.
- Pipe definition: la página más importante y necesaria. Se utiliza para definir todas las propiedades geométricas y físicas de la tubería, incluyendo los conectores, soportes intermedios y refuerzos.

En la pestaña "Pipe definition" tiene estas opciones que serán utilizadas:

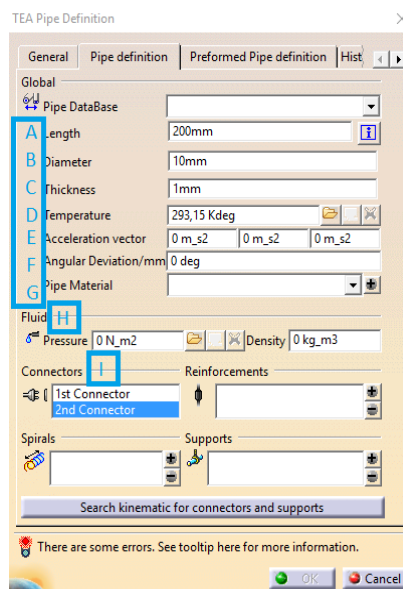


Figura 94. Pestaña: pipe definition.

- A) Length: es la parte externa o la distancia entre dos conectores en milímetros.

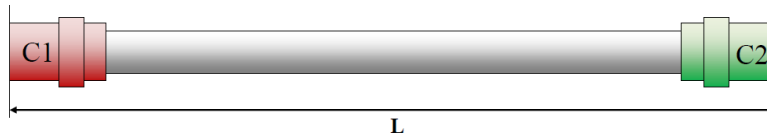


Figura 95. Length: distancia entre conectores.

- B) Diameter: el diámetro exterior del tubo en milímetros.
- C) Thickness: el espesor del tubo expresado en milímetros. Puede ser nula si no tiene un diámetro interior el tubo o es una sección completa.

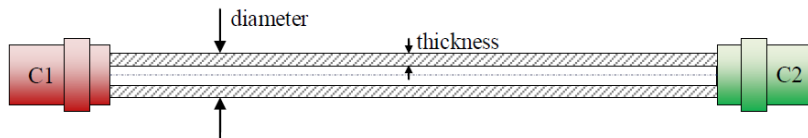


Figura 96. Diámetro y espesor del tubo.

- D) Temperature: es la temperatura ambiente a la que estará dispuesto el tubo.
- E) Acceleration vector: vector general rígido de la aceleración del cuerpo. Se modificará para indicar la gravedad.
- F) Angular Deviation/mm: no se utilizará. Es el ángulo de desviación de los ejes del perfil en milímetros. Como será nulo, no existirá el acoplamiento entre la elongación y la torsión.
- G) Pipe material: la indicación de un tipo de material a partir de la base de datos de materiales.
- H) Pressure & density: la presión del fluido en N/m^2 y su densidad en kg/m^3 .
- I) Connectors: se abre un panel al dar doble click sobre el 1st y 2nd conector. Las opciones dentro de este panel son:

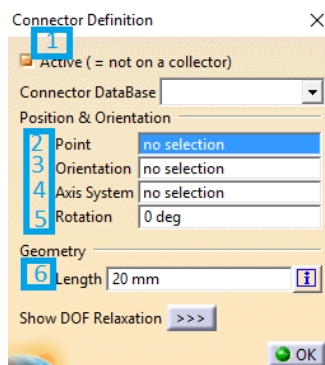


Figura 97. Panel "connectors".

- 1) Active: si un conector está vinculado a un colector debe estar desactivado. Si está desactivado solo se necesita el dato de la geometría, si está activado sí que son necesarios los demás datos.

- 2) Position: es un punto dibujado en Catia para indicar donde estará el conector.
- 3) Orientation: es un eje o línea para indicar la orientación de la tubería.
- 4) Axis system: sustituye opcionalmente, la posición y orientación por un sistema de ejes.
- 5) Rotation: define el ángulo de torsión en un conector. En las simulaciones será nulo.
- 6) Length: tamaño de la extremidad de la tubería que será considerado como rígido.

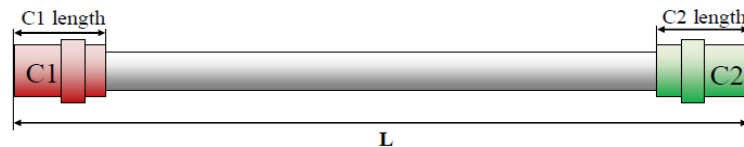


Figura 98. Length: tamaño de la extremidad de la tubería.

En la pestaña "General Data" se utilizará para indicar el nombre del tubo y para en la opción "Dynamic" poder cargar unas cargas dinámicas que serán explicadas en el siguiente apartado.

Después de introducir los datos de la tubería, se va al diseño del ensamblaje para poder acceder a la opción de "Tea Pipe Computation" o también llamada "Pipes computation". Dentro de la opción se tiene las siguientes sub-opciones que serán utilizadas:

- A) Pipe: salen indicadas todas las creaciones de tuberías que se han hecho.
- B) Compute selected pipes: se realiza la computación del tubo.
- C) Optimize selected pipe: abre la opción de hacer la función de optimización.
- D) Generate CAD for selected pipe: genera la computación y el CAD. O si se ha hecho antes la computación, solo genera el CAD. La geometría generada depende del tipo de análisis.
- E) Generate Report for selected pipes: genera un informe HTML en cada tubo computarizado. El informe depende del tipo de análisis.
- F) Generate 2D Plots for selected pipes: genera gráficos de curvas en cada tubo computarizado. Dependiendo del análisis saldrán unos tipos gráficos u otros.
- G) Analysis Tipe: son los tipos de análisis o simulaciones disponibles. Se explicarán más detalladamente en el capítulo 11.

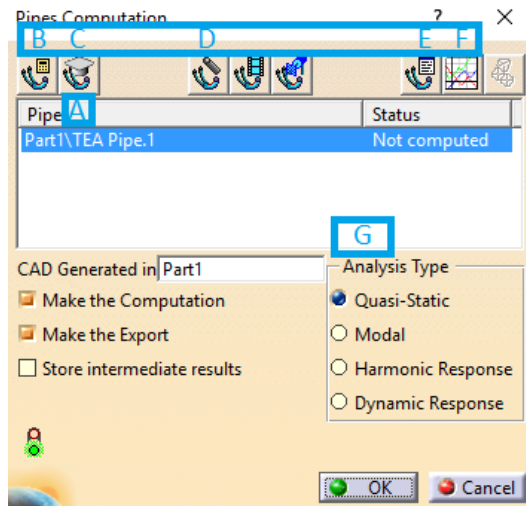


Figura 99. Panel de "Pipes computation".

Clicando a "Optimize selected pipe" se abre una nueva ventana. Esta ventana tiene las opciones de poder introducir los datos necesarios para hacer la optimización. Se divide en dos pestañas llamadas "Parameters" y "Optimization problem". En la primera se introducen los datos de los parámetros y en la segunda se introducen las restricciones y la función objetiva.

En la pestaña "Parameters" se indica en "Sub-level" si el parámetro está en el tubo entero o en uno de los dos conectores y debajo se indica el parámetro. Hay varios tipos de parámetros dependiendo de la elección en el "Sub-level", entre ellos la longitud, el diámetro, el espesor, la temperatura.... En este trabajo se escogerá la longitud total del tubo y posteriormente al clicar en "Add" se elige el mínimo y máximo valor del parámetro, el valor inicial que se tenga en cuenta para la optimización y en "NB steps" es el número de iteraciones a tener en cuenta (este último solo se tiene en cuenta para el estudio paramétrico no para la optimización, se explicará en el siguiente apartado).

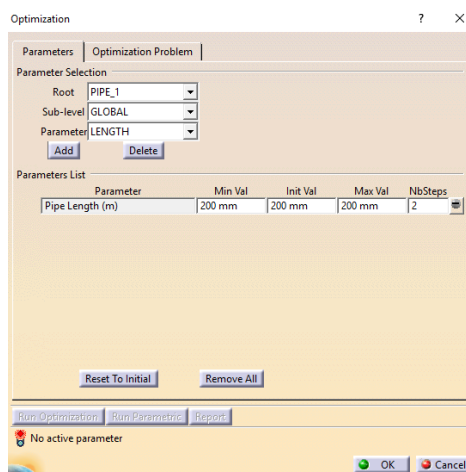


Figura 100. Pestaña: parameters.

Y en la pestaña "Optimization problems" se indica las restricciones y la función objetiva en el apartado de "Objectives & Constraints", en el siguiente apartado se explicará más detalladamente. En la opción de "Optimization Options" se elige el número de iteraciones máximas y el algoritmo a utilizar que será el SQP, ambas opciones son para hacer la optimización.

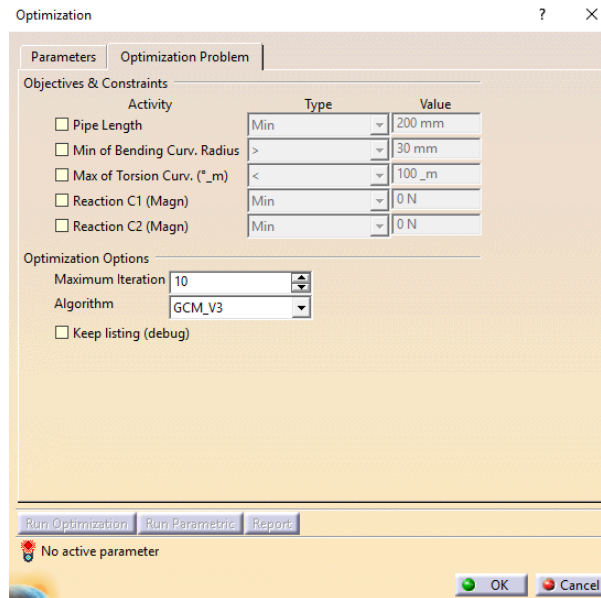


Figura 101. Pestaña: optimization problems.

CAPÍTULO 11: CÁLCULOS Y SIMULACIONES

11.1. Simulaciones con LMS

Las simulaciones se han realizado a partir de las piezas descritas en el apartado 8, que han sido diseñadas en el apartado 9 y que han sido situadas en sus puntos en el apartado 10. Son doce piezas las que componen el sistema, además de los tubos que serán calculados y diseñados por las simulaciones. Hay que tener en cuenta que las piezas número 1 y 2 que son el depósito y la válvula solenoide del depósito están unidas, al igual que las piezas 10, 11 y 12 que son el sensor de temperatura y de presión, la rampa de combustible y los inyectores.

No se tendrá en cuenta las piezas unidas en el panel de gas. Por lo tanto, las piezas del sensor de presión del depósito, del regulador de la presión del gas y de la válvula de seguridad del regulador de gas están separadas por la distancia descrita en el anterior apartado y unidas por tubos que serán simulados por el programa.

En cada simulación se han utilizado algunos de los paneles explicados en el anterior apartado, por eso, se detallará que panel se utilizará y los datos introducidos.

La primera simulación se ha encaminado a la modelización de las tuberías del modelo entero (con todas las piezas) a partir de unos datos (serán los

mismos para todas las simulaciones), en la segunda se han utilizado la optimización para mejorar el diseño de los tubos intentando reducir sus longitudes al mínimo posible, en la tercera se someterá a dos tubos a un modo de vibración, en la cuarta y quinta se someterán a estos dos tubos a una respuesta armónica y dinámica respectivamente.

Antes de realizar las simulaciones, se han sectorizado los conductos en bloques y por recorridos para simplificar la explicación de cada simulación. Se han simulado ocho tuberías donde cada una pertenecerá a un bloque. Los bloques están explicados en las tablas 9 y 10, donde del bloque 1 al 5 pertenecen al transporte del gas a 10 bar y del bloque 6 al 8 pertenecen al transporte del gas a 7,3 bar.

Tabla 9. Bloques del 1 al 5.

	GNL	Alta presión
	Desde	Hasta
Bloque 1	Depósito GNL y Válvula solenoide del depósito	Válvula de corte manual
Bloque 2	Válvula de corte manual	Filtro de combustible
Bloque 3	Filtro de combustible	Manómetro
Bloque 4	Manómetro	Sensor de presión del depósito
Bloque 5	Sensor de presión del depósito	Regulador de la presión del gas

Tabla 10. Bloques del 6 al 8.

	GNL	Baja presión
	Desde	Hasta
Bloque 6	Regulador de la presión del gas	Válvula de seguridad del regulador de gas
Bloque 7	Válvula de seguridad del regulador de gas	Válvula solenoide de corte gas, baja presión
Bloque 8	Válvula solenoide de corte gas, baja presión	Sensor de temperatura y presión, rampa de combustible e inyectores

11.1.1. Simulación de las tuberías

A partir del ensamblaje de todas las piezas unidas en sus puntos, se hace las simulaciones para poder unir cada pieza mediante tubos. En el programa se llama análisis casi-estático, en que realiza el montaje de las formas de los tubos.

Al entrar en el programa, primero se ha de poner que se tenga una base de datos de materiales en el menú de opciones. En este caso se escoge el archivo de texto que dispone el programa llamado "PipeMaterialDB.txt" y el archivo "PipeDB.xml". Esta base se utilizará para todas las simulaciones.

Después se abre el programa que está el ensamblaje de todas las piezas, pero para poder crear el tubo se ha de entrar dentro de la pieza que contiene todos los puntos de situación, en este caso de la pieza 2. Se entra clicando doble clic al archivo que se muestra en la imagen de abajo:



Figura 102. Archivo pieza 2.

Dentro se abre el panel de creación del tubo donde se han de poner los datos del tubo en la pestaña de definición del tubo. Los datos que depende el tubo son los siguientes:

- Material del tubo: se elegiría la opción, como en todas las simulaciones, de "FITTING_STEEL_1". Pero se ha utilizado el material genérico del programa llamado "PIPE_MATERIAL_1" que se utiliza para cualquier tipo de material.
- Diámetro: 12 mm (descrito en el apartado 7).
- Espesor: 1 mm (descrito en el apartado 7).
- Temperatura: se escoge una temperatura ambiente de 20° que son 293,15 K.
- Vector acelerador: se impone la gravedad como (0,0, -9,81) m/s² en el eje Z.
- Longitud: depende de la situación de los conectores, el programa al indicar los puntos de los conectores indica una medida mínima necesaria dependiendo de la distancia. Se ha escogido una distancia cercana a este mínimo con una escala de 50 mm para hacer las simulaciones. En el bloque 6 no se ha podido poner a la distancia más cercana posible. Posteriormente, en la optimización se intentará reducir esta longitud al mínimo posible. Las distancias son:
 - Bloque 1:
 - Mínimo exigido = 1056,45 mm
 - Medida elegida = 1100 mm
 - Bloque 2:
 - Mínimo exigido = 612,577 mm
 - Medida elegida = 650 mm
 - Bloque 3:

- Mínimo exigido = 1500,32 mm
- Medida elegida = 1550 mm
- Bloque 4:
 - Mínimo exigido = 1319,35 mm
 - Medida elegida = 1350 mm
- Bloque 5:
 - Mínimo exigido = 423,553 mm
 - Medida elegida = 450 mm
- Bloque 6:
 - Mínimo exigido = 1052,86 mm
 - Medida elegida = 1200 mm
- Bloque 7:
 - Mínimo exigido = 2576,32 mm
 - Medida elegida = 2600 mm
- Bloque 8:
 - Mínimo exigido = 914,765 mm
 - Medida elegida = 950 mm
- Densidad del fluido: 460 kg/m³ (dato proveniente del apartado 5)
- Conectores: depende de la posición de cada pieza, los conectores están colocados en las posiciones según las indicadas en el apartado diez. Se indican en el apartado de conectores; el primer y segundo conector. En la opción Length se introduce la longitud rígida de la tubería que pertenece cuando está dentro de la pieza. En cada bloque tiene un saliente y entrante de la tubería donde sale y entra de la pieza. Estas longitudes dependen de las medidas de la pieza. La parte saliente se indica al primer conector y la parte entrante al segundo conector. Estas longitudes son:

Tabla 11. Longitudes para la opción "length".

Primer conector	Bloques	Segundo conector
90 mm	Bloque 1	44,5 mm
44,5 mm	Bloque 2	75 mm
75 mm	Bloque 3	25 mm
25 mm	Bloque 4	40 mm
40 mm	Bloque 5	30 mm
30 mm	Bloque 6	42,5 mm
80 mm	Bloque 7	35 mm
35 mm	Bloque 8	30 mm

Al indicar cada punto de inicio y salida y sus orientaciones, se podrá ver en la pantalla 3D una flecha roja de inicio de la tubería y una flecha verde de final de la tubería que indican el sentido del tubo. También se ve una línea naranja que sería la forma de la tubería antes de ser calculada y simulada.

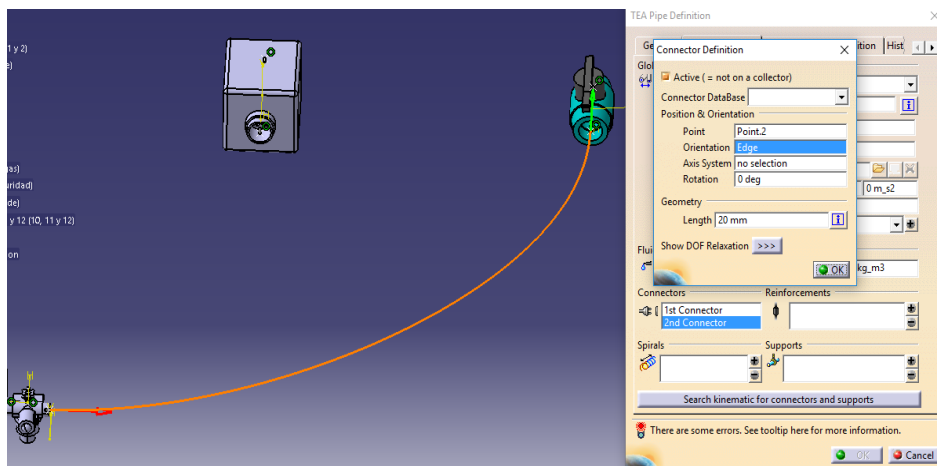


Figura 103. Imagen pre-tubería.

- Presión del fluido: para la presión del fluido tendría que ser; del bloque 1 al 5 la presión es de 10 bar y del bloque 6 al 8 la presión es de 7,3 bar. Pasado a N/m² es de 1.000.000 N/m² y de 730.000 N/m² respectivamente.

Pero al hacer las simulaciones, el programa ha dado problemas en el montaje. En cada caso salía el siguiente error:

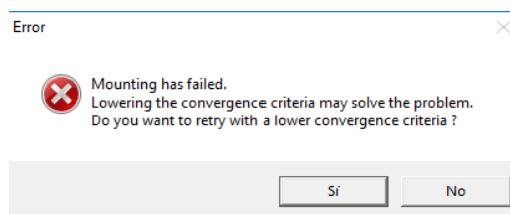


Figura 104. Pantalla del error.

Explica que el proceso de montaje ha fallado. El programa sugiere la reducción de los criterios de convergencia establecidos por el programa. Se probó de hacer la sugerencia, pero en algunos bloques incluso fallo su montaje con esta variante. También se probó de variar la longitud en estos bloques que daban problemas, pero no se consiguió solucionarlo. Al descubrir que el error está en la computación del programa cuando tenía en cuenta la presión del fluido y del material, se decidió hacer las computaciones sin tener en cuenta la presión del fluido y con el material genérico llamado "PIPE_MATERIAL_1".

Todos los datos de las tuberías son iguales para todos los tubos, excepto en la longitud y en la colocación de los conectores, que varían. En algún caso se ha tenido el mismo problema en el proceso de montaje, pero se ha solucionado aumentando la longitud de la tubería (en el bloque 6). O teniendo problemas al no cumplir el radio mínimo de curvatura, como en el caso del montaje del bloque 6 al poner una longitud de 1150 mm:

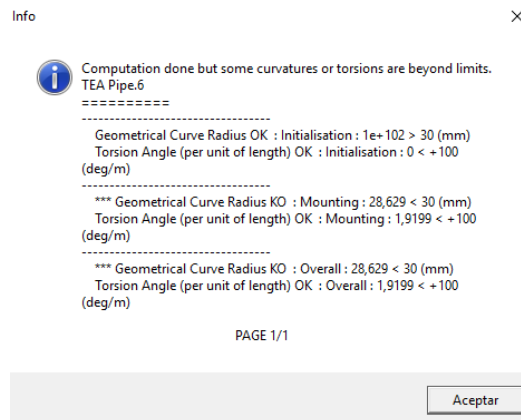


Figura 105. Información del problema.

Después de la introducción de los datos se ha de volver al ensamblado de todas las piezas llamado "producto final" y de ahí entrar a computación de los tubos (Pipes computation). Dentro de la pantalla, se selecciona el tubo (se revisa que el tipo de análisis es casi-estático) y se genera el CAD. El cálculo se realizará y al final se elegirá la opción de montaje (mounting) para que se haga el montaje del tubo. Al realizar los cálculos se han tenido los problemas descritos anteriormente que luego se han resuelto incrementando la longitud.

Cuando se han hecho todos los montajes, el modelo queda de la siguiente manera:

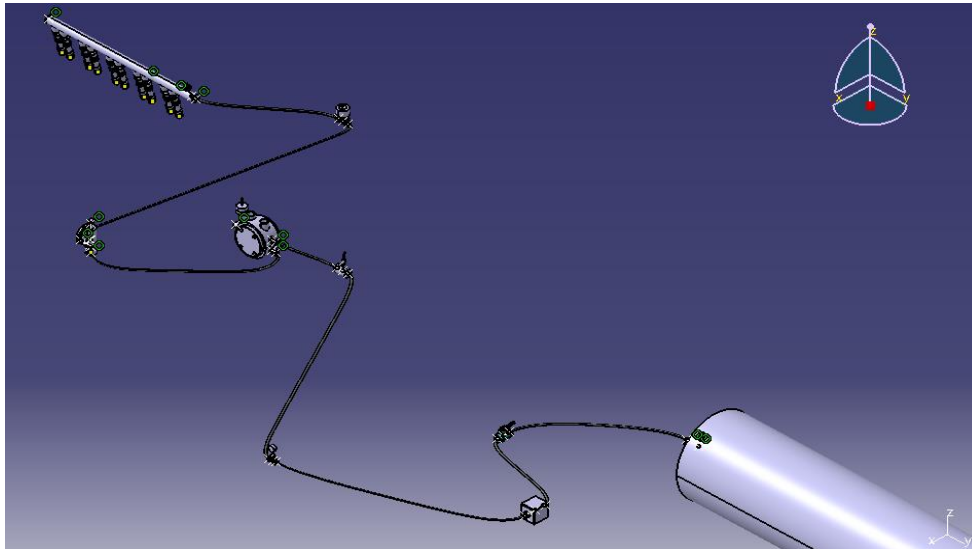


Figura 106. Modelo generado.

Los montajes de cada bloque en particular, son los siguientes:

- Bloque 1.

En la figura 107 está la vista isométrica del bloque 1 sin la pieza 1 del depósito. Se puede ver a la derecha de la imagen, la entrada del tubo hacia la pieza 1, es el trozo del tubo de más a la derecha y es donde acaba el tubo. Este trozo está dentro de esta pieza:

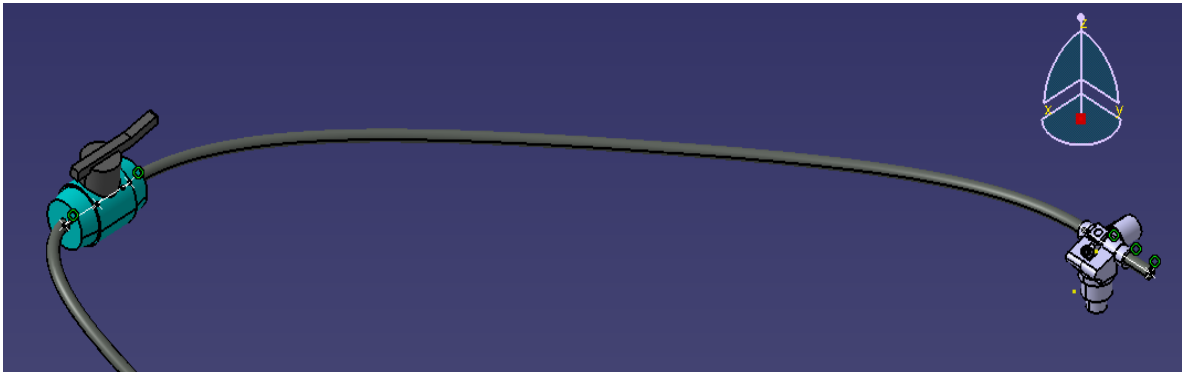


Figura 107. Bloque 1 Vista isométrica.

Dentro de la computación de tubos, se puede descargar un informe en "Generate report for selected pipes" y diferentes gráficos en "Generate 2D plots for selected pipes" de cada bloque. En el bloque 1 tenemos este informe:

TEA Pipe.1

	Geometrical Curve Radius	Torsion Angle (per unit of length)
Initialisation	1e+102 > 30 (mm)	0 < +100 (deg/m)
Mounting	181.425 > 30 (mm)	0.288829 < +100 (deg/m)
Overall	181.425 > 30 (mm)	0.288829 < +100 (deg/m)

TEA Pipe.1

Status of Computation : OK

	First Connector					Second Connector				
		X	Y	Z	magn		X	Y	Z	magn
Initialisation	Reaction Force (N)	0	0	0	0	Reaction Force (N)	0	0	0	0
	Reaction Moment (N/m)	0	0	0	0	Reaction Moment (N/m)	0	0	0	0
	Pulling Force (N)					Pulling Force (N)				0
Mounting	Reaction Force (N)	-0.793202	0.987105	0.121791	1.27216	Reaction Force (N)	0.793202	-0.987105	0.111277	1.27119
	Reaction Moment (N/m)	-0.0211911	7.53618e-005	-0.194876	0.196025	Reaction Moment (N/m)	7.53618e-005	0.0160646	0.204438	0.205067
	Pulling Force (N)				-0.987105	Pulling Force (N)				-0.793202
Overall		X	Y	Z	magn		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	-0.793202	0.987105	0.121791	1.27216	Max Reaction Force (N)	0.793202	-0.987105	0.111277	1.27119
	Max Pulling Force (N)				-0.987105	Max Pulling Force (N)				-0.793202

Figura 108. Informe bloque 1.

Todos los informes en cada bloque son iguales. Los cuales, primero indican el radio de la curva geométrica y el ángulo de torsión en los tres pasos o procesos de la configuración; La inicialización que son las medidas iniciales previas al montaje, el montaje que son las medidas durante el montaje y al final del montaje que salen los resultados totales o finales (overall). Se puede ver que han de cumplir que el radio sea más grande de 30 mm y la torsión más pequeña que 100 deg/m. En todos los bloques cumplen estas restricciones que son necesarias para que el programa haga la simulación en 3D.

En el segundo indican la fuerza y el momento de reacción y la fuerza de tracción en cada conector durante los mismos tres procesos del montaje.

Seguidamente se muestran los gráficos que muestra el programa:

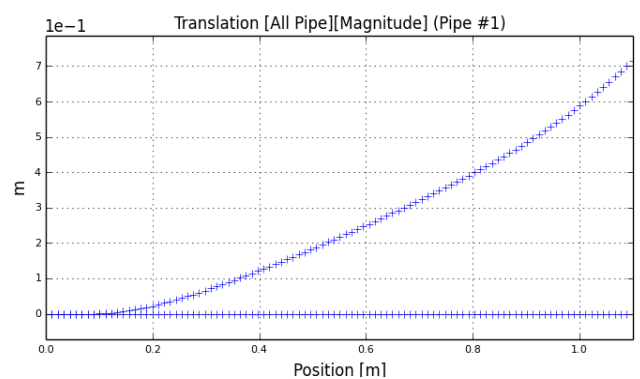
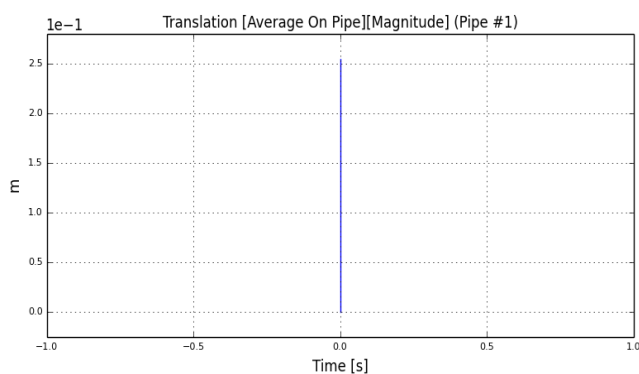


Figura 109. Traslado (promedio en el tubo) Figura 110. Traslado (todo el tubo)

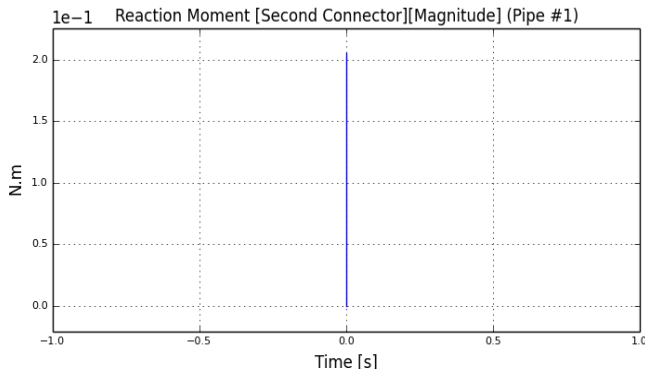


Figura 111. Momento de reacción

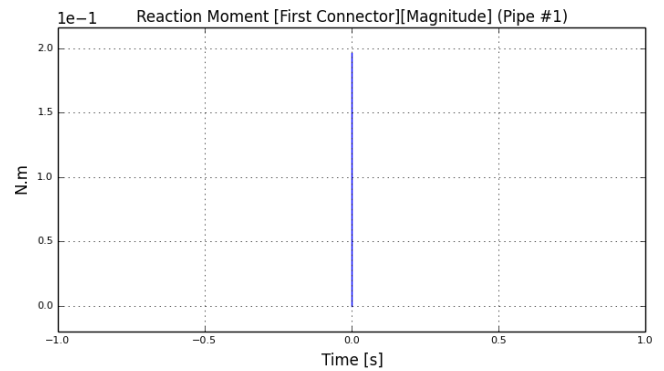


Figura 112. Momento de reacción

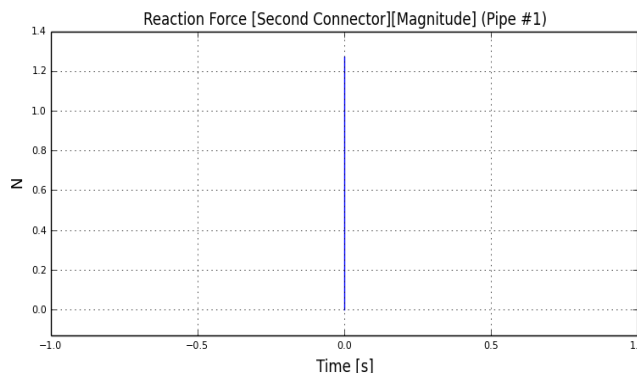


Figura 113. Fuerza de reacción

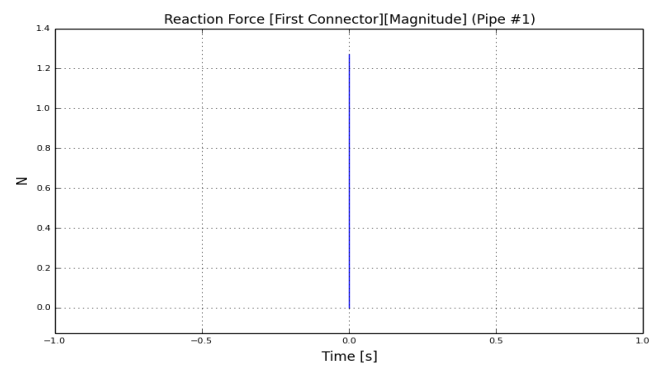


Figura 114. Fuerza de reacción

En los gráficos se puede observar que todos son en magnitud (el programa también tiene la opción de descargar los gráficos por cada eje), los demás gráficos de cada bloque están en los anexos y se explicará cada uno de ellos:

- Traslado o desplazamiento (promedio en el tubo): calcula el traslado promedio en metros a lo largo del tiempo. El más grande es el bloque 7 con unos 1,6m y el más pequeño es el bloque 5 con unos 0,137 m.
- Traslado o desplazamiento (en todo el tubo): calcula el desplazamiento en el eje Y respecto la posición a lo largo de la tubería en el eje X. El que vuelve a tener un mayor desplazamiento respecto la posición es el bloque 7 y el más pequeño vuelve a ser el bloque 5.
- Momento de reacción del segundo conector: calcula el momento de reacción en Nm a lo largo del tiempo. El que tiene mayor momento es el bloque 2 con unos 1,65 Nm y el menor momento es el bloque 1 con unos 0,205 Nm.
- Momento de reacción del primer conector: calcula el momento de reacción en Nm a lo largo del tiempo. El que tiene mayor momento es el bloque 7 con unos 1,8 Nm y el menor momento son los bloques 1 y 3 con unos 0,19 Nm.

- Fuerza de reacción del segundo conector: calcula la fuerza de reacción en N a lo largo del tiempo. El que tiene mayor fuerza es el bloque 8 con unos 7 N y la menor fuerza es el bloque 4 con unos 0,9 N.
- Fuerza de reacción del primer conector: calcula la fuerza de reacción en N a lo largo del tiempo. El que tiene mayor fuerza es el bloque 8 con unos 7 N y la menor fuerza es el bloque 4 con unos 0,9 N.

Como se puede ver tanto el desplazamiento, como el momento y la fuerza no varían en el tiempo porque no tienen un desplazamiento forzado que dependa del tiempo. Y las fuerzas de reacción son las mismas prácticamente en cada conector de cada bloque.

Los otros informes y gráficos de los siguientes bloques están en los anexos.

- Bloque 2.

La vista isométrica del bloque 2:

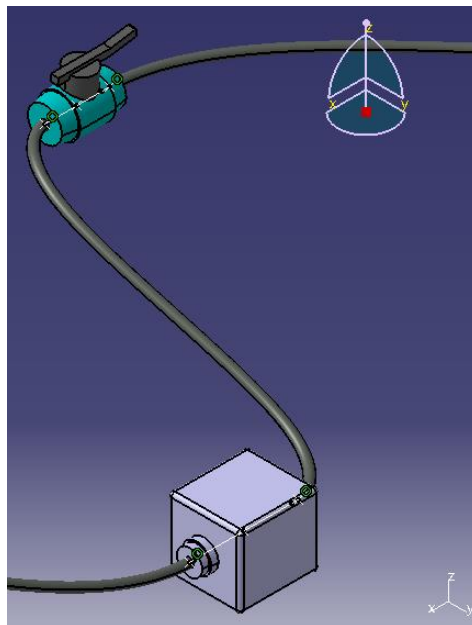


Figura 115. Bloque 2 Vista isométrica.

En la imagen de la figura 116 se puede ver la unión entre el bloque 2 y 3 sin la pieza 3 para poder ver dicha unión:

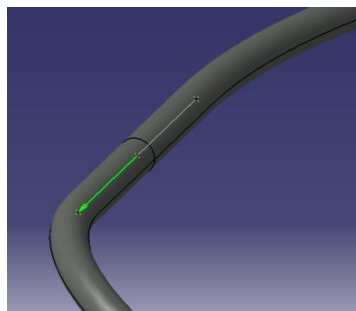


Figura 116. Unión bloque 2 y 3.

- Bloque 3.

La vista isométrica del bloque 3:



Figura 117. Bloque 3 Vista isométrica.

- Bloque 4.

La vista isométrica del bloque 4:

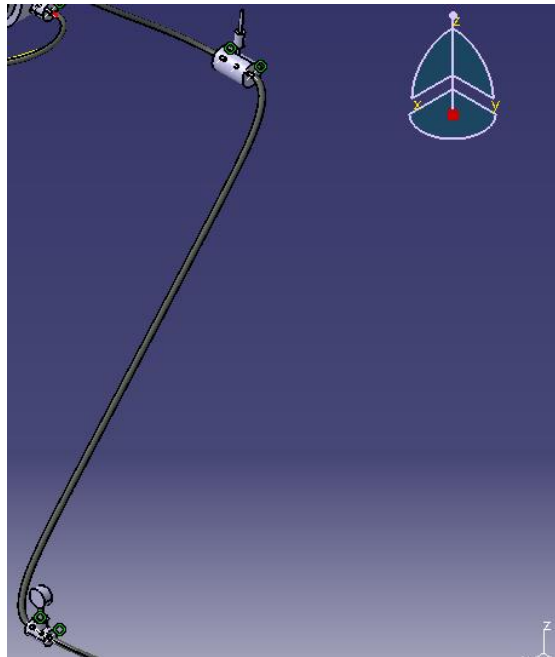


Figura 118. Bloque 4 Vista isométrica.

- Bloque 5.

La vista isométrica del bloque 5:

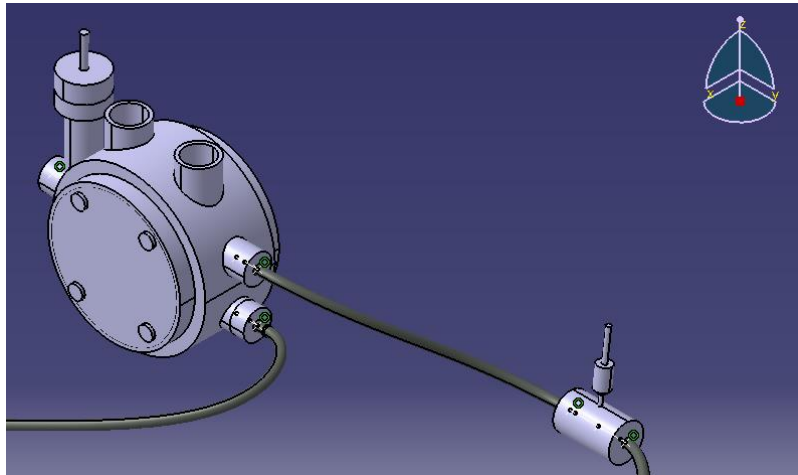


Figura 119. Bloque 5 Vista isométrica.

- Bloque 6.

La vista isométrica del bloque 6:



Figura 120. Bloque 6 Vista isométrica.

- Bloque 7.

La vista isométrica del bloque 7:

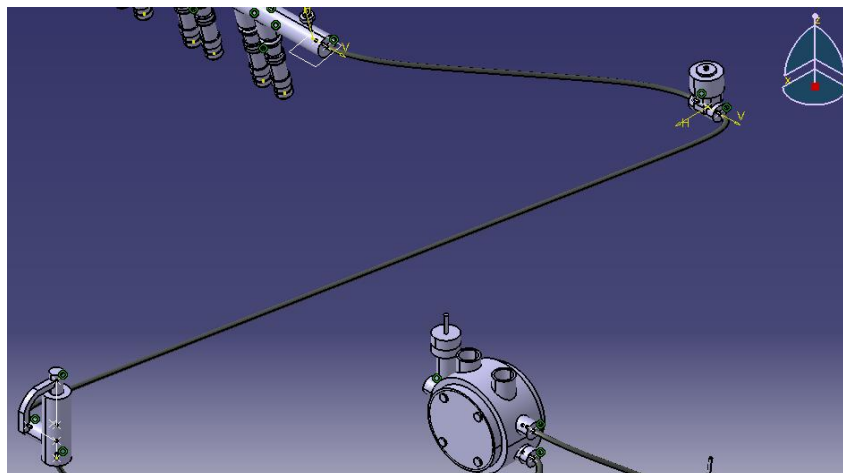


Figura 121. Bloque 7 Vista isométrica.

- Bloque 8.

La vista isométrica del bloque 8:

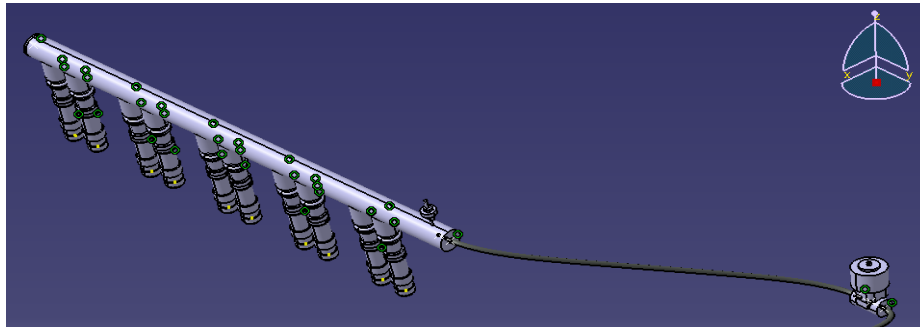


Figura 122. Bloque 8 Vista isométrica.

11.1.2. Simulación utilizando la optimización

La optimización es un proceso que matemáticamente se define de la siguiente manera; Actuando sobre algunos parámetros (llamados variables de diseño), intenta conseguir el mínimo de una función a partir de estos parámetros (llamado función objetivo), teniendo en cuenta unas funciones de restricción. Por ejemplo, en el caso que se ocupa; en una tubería encontrar la mínima longitud posible (función objetivo que está sometida a unas variables) teniendo alguna restricción como el valor de curvatura mínima.

Una función similar a la optimización es el estudio paramétrico. Donde se hace una serie de análisis para diferentes conjuntos de datos. Donde no se tiene una función objetivo, si no se hace un análisis a partir de una o más restricciones.

Se han hecho las simulaciones tanto de la optimización como del estudio paramétrico. Ambos necesitan el mismo tipo de datos, y en los dos se ejecuta el mismo tipo de proceso. Con la diferencia que en el primer caso la evolución de los parámetros se determina por el programa con el fin de mejorar la solución y en el segundo caso se impone estos parámetros desde el principio con el fin de explorar el rango definido y encontrar una solución definitiva. Como en las otras simulaciones hechas, el programa hace la optimización para una tubería, no para un conjunto de ellas.

En este caso se utilizará el modelo completo como en la primera simulación con todos los bloques, pero cada optimización y estudio paramétrico se hará individualmente a cada una de las ocho tuberías.

El proceso para hacer esta simulación es el siguiente:

Primero, se introducen los datos de cada tubería como en la primera simulación.

Segundo, dentro de la pantalla de "Pipes computation" se clicca en "Optimization" y se abre el panel de "Optimization" descrito en el anterior apartado.

Tercero, dentro de la pestaña "Parameters" los parámetros que se indiquen servirán tanto para el estudio paramétrico como en la optimización.

Cuarto y último, en la pestaña de "Optimization problem" se introducirán las funciones objetivas o las restricciones y el algoritmo de optimización. También se indicarán seguidamente las restricciones (llamadas "Activity" en el programa), pero para diferenciar entre una optimización y un estudio paramétrico, se indicarán dentro de la columna "Type":

- Verificando la restricción que se le quiera indicar, si en "Type" se selecciona solo la opción $>$ o $<$ sobre un valor o más valores, el programa solo dejará hacer un estudio paramétrico clicando posteriormente en "Run parametric".
- En cambio, verificando la restricción o las restricciones que se le quiera indicar, si en "Type" se selecciona la opción Min o Max sobre un valor o más valores, el programa dejará hacer tanto un estudio paramétrico como una optimización. Esta última, clicando posteriormente en "Run optimization".

En la pestaña "Parameters" se indicará tanto en "Min Val" como en "InitVal" el valor mínimo que exige el programa para la longitud de cada tubería. En "Max Val" se indicará el valor de longitud que se introduzco en la primera simulación en cada bloque y en "Nb Steps" son el número de las iteraciones o análisis en que el programa hace a partir de los parámetros, en todas serán diez (solo se utiliza para el estudio paramétrico).

Por último, se explicará las restricciones que se indicarán en las simulaciones del estudio paramétrico y la optimización. Hay que tener en cuenta las dos restricciones que utiliza el programa para moldear las tuberías:

- El radio mínimo de flexión de la curva del tubo tiene que ser mayor de 30 mm.
- El valor máximo de torsión en la curva del tubo tiene que ser menor de 100 deg/m.

A partir de estas restricciones se hacen estas simulaciones:

- Estudio paramétrico:

Se indica en el programa que la restricción "Min of Bending Curb. Radius" sea >30 mm y que la restricción "Min of Torsion Curv." sea < 100 deg/m. A partir de estos datos se hace el estudio paramétrico.

Entonces, el programa calcula valores de longitud a partir de las 10 iteraciones indicadas y del mínimo y máximo del tubo. Por ejemplo, si la longitud mínima es 200 mm y la máxima es 300 mm, calcula el radio y la torsión para valores de longitud de 200mm, 210, 220... hasta 300 mm y los introduce en 3 gráficos. En las figuras 123, 124 y 125 se pueden comprobar los resultados del bloque 3 como ejemplo:

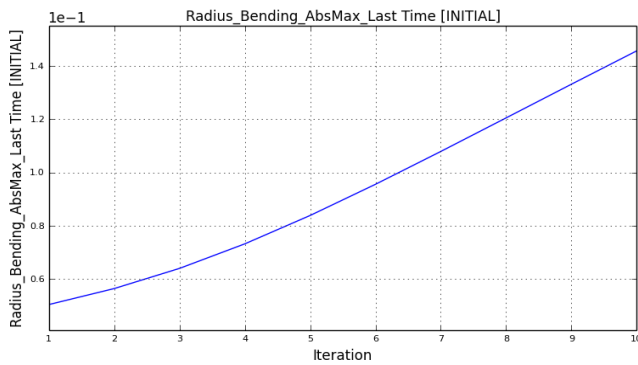


Figura 123. Radio en cada iteración

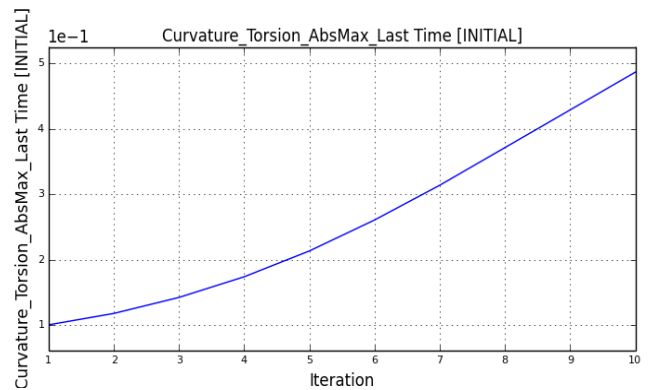


Figura 124. Torsión en cada iteración

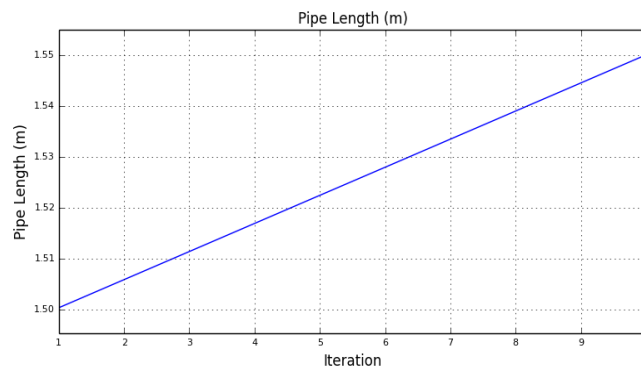


Figura 125. Longitud en cada iteración

El programa calcula esto tres gráficos. En el gráfico de la longitud, el programa calcula una recta dividiendo la distancia entre la longitud mínima y máxima entre las diez iteraciones y encuentra los resultados del radio y del grado de torsión mostrados en las gráficas de arriba. En los gráficos, la longitud y el radio están en m y la torsión en deg/m. Se verá en los bloques 2 y 6, que el radio indicado es menor de los 30 mm exigidos como mínimo, el programa al hacer el estudio paramétrico no tiene en cuenta que los radios tienen que ser mayores que dicho valor.

- Optimización:

Se mantiene las restricciones, pero se añade "min" en la longitud del tubo y se indica el valor elegido de la primera simulación. Con esto, se busca minimizar la longitud del tubo teniendo en cuenta las restricciones antes indicadas. En este caso, sí que tiene en cuenta las restricciones del radio >30 mm y torsión < 100 deg/m.

Para minimizar esta longitud se utiliza la optimización con el algoritmo SQP y un máximo de 10 iteraciones (se indican en la opción "Optimization options"). SQP, también llamado programación cuadrática secuencial, es un método iterativo para calcular una optimización no lineal.

Cuando se ha hecho la simulación el programa muestra el valor final de la optimización y en que iteración se ha encontrado. También, muestra tres gráficas para demostrar el resultado. Un ejemplo de las gráficas se puede observar en el bloque 2:

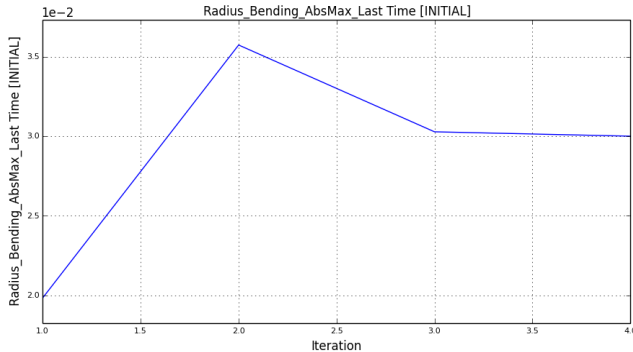


Figura 126. Radio en cada iteración

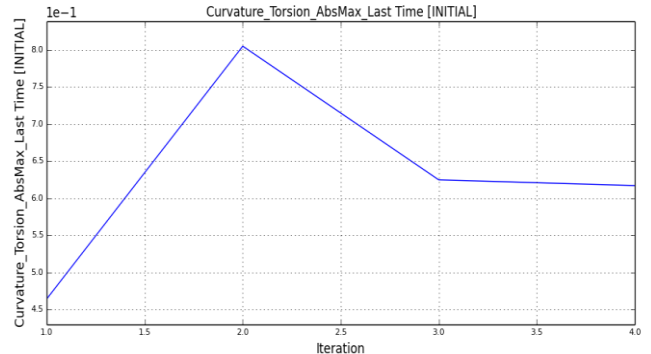


Figura 127. Torsión en cada iteración

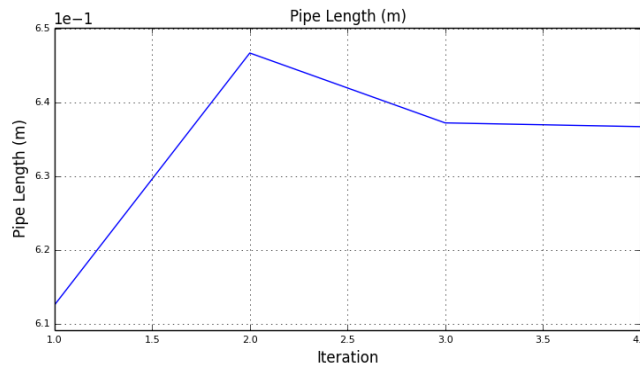


Figura 128. Longitud en cada iteración

En el bloque 2 se puede ver como en los tres gráficos se busca optimizar para encontrar, hasta cuatro iteraciones, un resultado repetido cumpliendo las restricciones.

Se comprobará que se realice la computación de las tuberías, en cada bloque, sin problemas mediante el resultado optimizado por el programa.

Los resultados que se han encontrado se explicarán a continuación para cada bloque y los gráficos de cada uno se podrán ver en los anexos. En los gráficos se puede ver que, en todos los bloques, en el estudio paramétrico, el radio y la torsión aumentan con la distancia excepto en el bloque 6. Los resultados y conclusiones de cada bloque son:

- Bloque 1,3,4,7 y 8:

Desde el estudio paramétrico se puede ver que en el rango de longitud tanto el radio como la torsión cumplen las restricciones. Por esta razón, cuando hace la optimización encuentra en la segunda iteración que el resultado es la mínima longitud posible para cada bloque. En todos estos casos se ha resuelto de la misma manera. La mínima longitud en cada bloque es la siguiente:

- Bloque 1: 1056,46 mm

- Bloque 3: 1500,33 mm
- Bloque 4: 1319,36 mm
- Bloque 7: 2576,33 mm
- Bloque 8: 914,766 mm

Por último, en la prueba de hacer el CAD con estas longitudes, en estos bloques se ha podido hacer correctamente y por lo tanto se ha podido reducir las longitudes de la primera simulación sin problemas.

Debajo se puede ver la imagen de cómo era antes y ahora la tubería en el bloque 1 con la reducción de su longitud, donde la pieza 2 no se muestra y se ve casi la unión con el bloque 2:

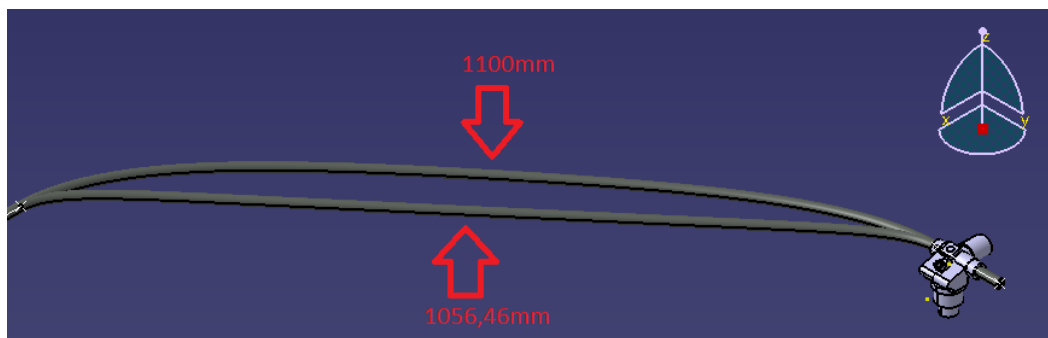


Figura 129. Antes y ahora de la tubería del bloque 1.

- Bloque 5:

Según los resultados del bloque 5, se puede ver que es un caso similar al conjunto de bloques explicado anteriormente. Pero, en este caso se ha tenido problemas al hacer la comprobación con la longitud mínima. La longitud mínima es de 423,554 y en este caso, al hacer el montaje del tubo ha dado este error:

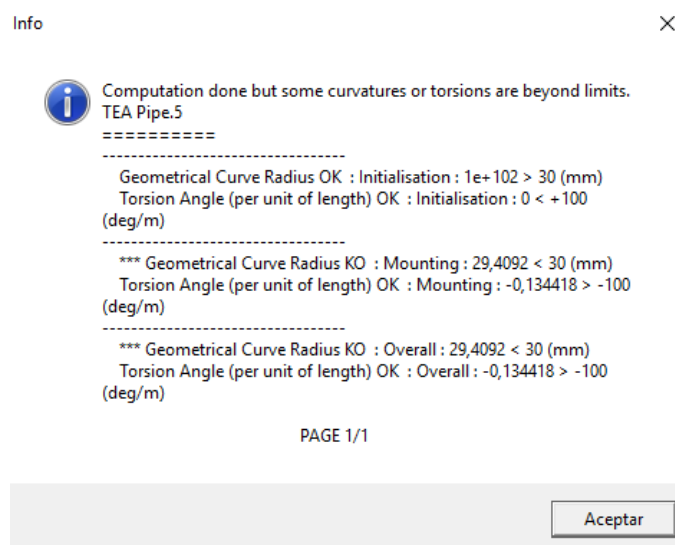


Figura 130. Información del error generado.

Dice que el radio de geometría está en 29,4092 mm, pero si miramos este radio en el estudio paramétrico, esta medida está superior a los 40 mm para esta longitud. En este bloque, se puede considerar que el estudio paramétrico, la optimización y los resultados del CAD no concuerdan. Posteriormente, se probó de hacer la computación del tubo a una longitud de 425mm y no hubo problemas en realizarlo.

- Bloque 2:

Los resultados han sido diferentes en el bloque 2 y 6 a los demás. En el bloque 2, en el estudio paramétrico, se puede ver que hasta prácticamente la iteración 7 los radios eran menores de 30 mm. Por esta razón, al hacer la optimización no ha dado como resultado la longitud mínima posible. Si no que el resultado ha estado en la cuarta iteración y es de 636,748 mm, cuando el mínimo es de 612,577 mm. Debajo se puede ver como lo indica el programa:

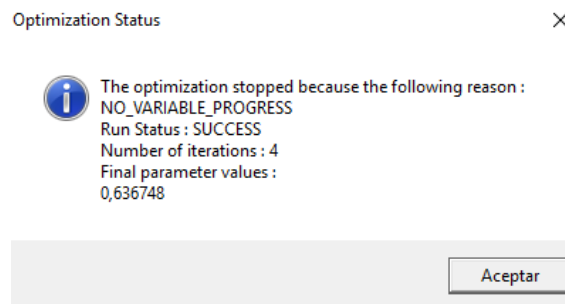


Figura 131. Bloque 2: Resultado programa.

Se comprobó que no dio problema al utilizar esta medida para hacer la nueva forma del tubo, y sí que dio problemas de convergencia cuando se hizo la computación con una medida de 636 mm (menor a la de la optimización). Los resultados en este bloque concuerdan totalmente.

- Bloque 6:

En este bloque se ha tenido problemas al hacer el estudio paramétrico por que el programa a veces no daba los mismos resultados. Al hacer las pruebas se comprobó que los gráficos del anexo son los más adecuados para el tubo, donde hasta la iteración 7 no supera los 30 mm de radio. Por esto en la primera simulación se utilizó una medida de 1200 mm y no de 1100 ya que el programa daba errores en las longitudes anteriores a los 1200 mm (se ha explicado en la primera simulación).

Los gráficos resultantes del bloque 6 son diferentes a los demás bloques porque en el radio primero desciende con el incremento de la longitud, pero luego asciende y en la torsión es descendiente, pero a partir de la cuarta iteración es constante. Ambos son diferentes a los otros bloques en que eran totalmente crecientes.

Además, no se ha podido hacer la optimización porque al intentar hacerla el programa mostraba este error:

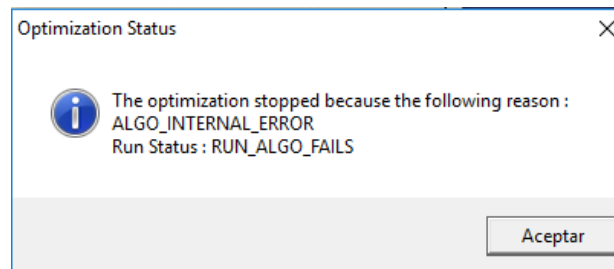


Figura 132. Bloque 6: error en optimización.

Igualmente, al aprovechar el estudio paramétrico se ha podido reducir esta longitud. Teniendo en cuenta que con una longitud algo superior de la iteración 7 ya cumple el radio y la iteración 7 la longitud es de 1150mm se ha escogido una longitud parecida a la iteración 8 que será de 1170mm aproximadamente. Se ha comprobado esta longitud y se ha podido hacer el montaje sin problemas.

11.1.3. Análisis del modo de vibración.

El programa permite hacer un análisis del modo de vibración a partir de la definición de un tubo y aplicándole un rango de frecuencia. Un modo de vibración es un patrón o una forma característica en el que vibra un sistema mecánico. En este caso son los tubos que al estar dentro de un camión vibran por el funcionamiento del MCI y los defectos del terreno, por eso generan modos de vibración. Mediante este análisis modal se puede determinar la forma de esos modos y su ubicación mínima y máxima. Para todos estos modos de vibración será posible visualizar la forma deformada de la tubería.

En el análisis se utilizará el modelo de la primera simulación y se realiza a la vez tanto el análisis casi-estático (para calcular el estado de estrés) y un análisis modal dentro de un rango de frecuencias determinado (también tiene en cuenta la configuración de la tensión obtenida durante el análisis casi-estático). Se hará la simulación para dos bloques y que se representarán en dos ensamblajes diferentes; un bloque de longitud larga como es el siete y un bloque de longitud corta como es el cinco. Cada bloque tendrá las mismas distancias que fueron explicadas en el apartado diez.

Se introducen los mismos datos en la definición del tubo. Y seguidamente, al hacer la computación se hará un análisis modal dentro del rango de una frecuencia mínima y máxima.

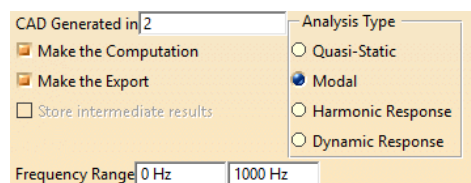


Figura 133. Datos análisis modal.

A cada bloque se someterá a tres rangos de frecuencias, los rangos elegidos son [0 Hz ; 1000 Hz], [0 Hz ; 500 Hz] y [250 Hz ; 750 Hz].

Se indica el rango y se hace la computación. Al acabar la computación y se quiere generar el CAD, el programa enseña la cantidad de modos de vibración que se ha generado y pregunta cuantos, y cuales modos se quieren para generar su forma. En todos los casos se escogerán los siete primeros modos. También pregunta la escala, que será la del tamaño real (1) y hay una opción debajo para si se quiere que los modos salgan en forma sólida, como tubos en vez de líneas.

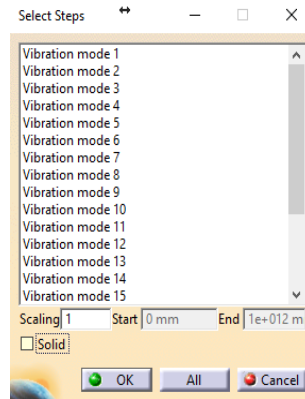


Figura 134. Cantidad de modos generados.

Seguidamente, se podrá ver todos los resultados que muestra el programa al generar la forma de cada uno de los modos de vibración y los informes correspondientes. No se generan gráficos en esta simulación.

- Bloque 5:

Para la frecuencia: [0 Hz ; 1000 Hz]. Se han generado 26 modos de vibración, los 7 primeros son:

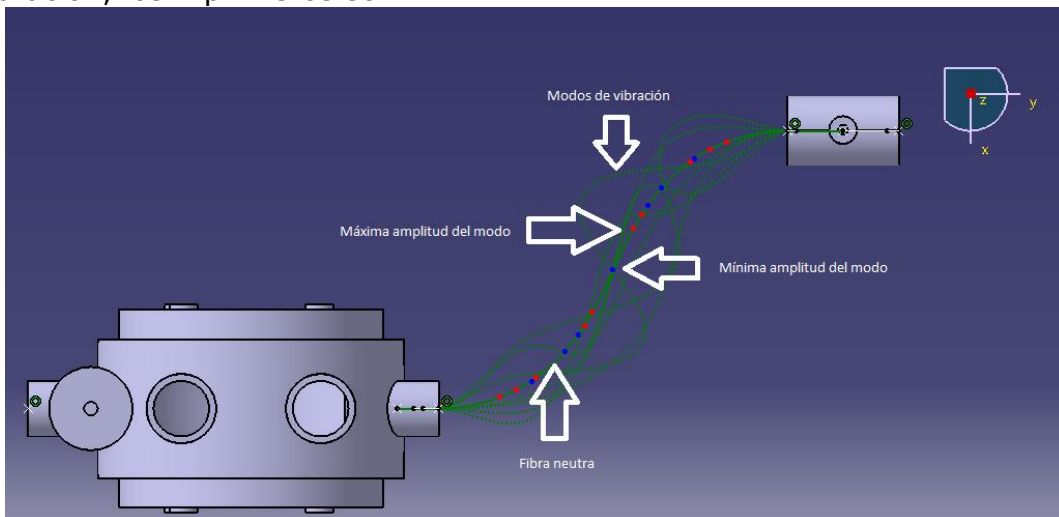


Figura 135. Bloque 5: modos de vibración.

La línea fija de color verde indica la fibra neutra y las líneas echas por puntos indican los siete modos de vibración que se han generado. Los puntos en rojo indican la amplitud máxima de un modo y los puntos azules la amplitud mínima. Todos los modos de vibración se generan en 3D.

Si se quiere que salga en forma sólida, el programa muestra los modos de la siguiente forma:

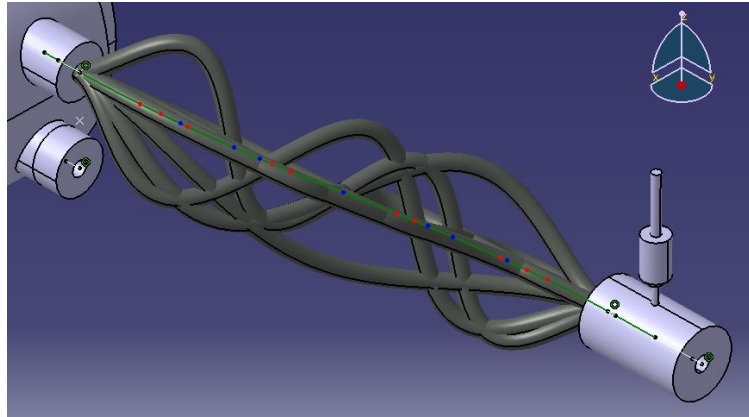


Figura 136. Bloque 5: modos de vibración en forma sólida.

Para la frecuencia: [0 Hz ; 500 Hz]. Se han generado 15 modos de vibración, los 7 primeros son:

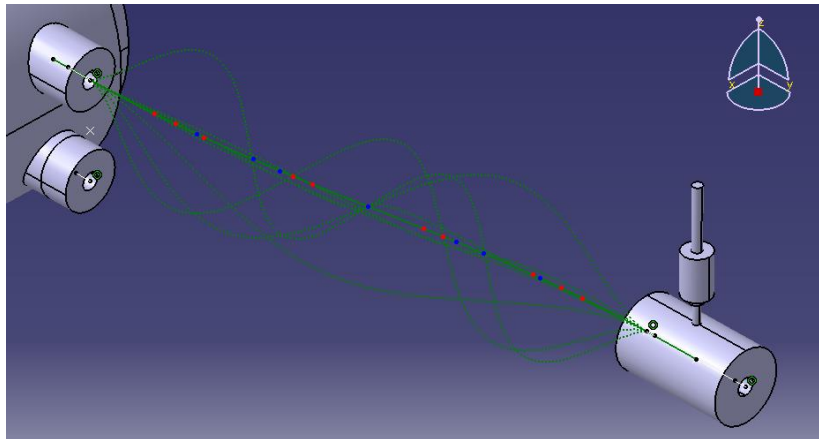


Figura 137. Modos de vibración.

Y para la frecuencia: [250 Hz ; 750 Hz]. Se han generado 12 modos de vibración, los 7 primeros son:

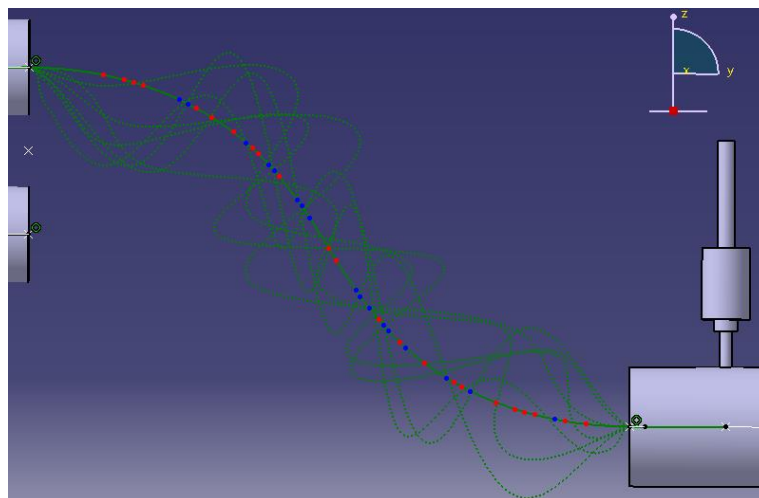


Figura 138. Modos de vibración.

Los informes correspondientes a los rangos de frecuencias seleccionadas son los siguientes, de izquierda a derecha son los rangos de [0 Hz ; 1000 Hz], [0 Hz ; 500 Hz] y [250 Hz ; 750 Hz]. Indican las frecuencias de cada modo de vibración:

TEA Pipe.2

Status of Computation : OK

Vibration mode 1 (f=22,1338 Hz)
Vibration mode 2 (f=24,8053 Hz)
Vibration mode 3 (f=67,4175 Hz)
Vibration mode 4 (f=109,066 Hz)
Vibration mode 5 (f=134,074 Hz)
Vibration mode 6 (f=171,714 Hz)
Vibration mode 7 (f=214,843 Hz)
Vibration mode 8 (f=219,672 Hz)
Vibration mode 9 (f=287,524 Hz)
Vibration mode 10 (f=290,777 Hz)
Vibration mode 11 (f=319,593 Hz)
Vibration mode 12 (f=430,774 Hz)
Vibration mode 13 (f=433,212 Hz)
Vibration mode 14 (f=433,447 Hz)
Vibration mode 15 (f=476,814 Hz)
Vibration mode 16 (f=558,258 Hz)
Vibration mode 17 (f=591,097 Hz)
Vibration mode 18 (f=649,624 Hz)
Vibration mode 19 (f=666,645 Hz)
Vibration mode 20 (f=692,436 Hz)
Vibration mode 21 (f=816,437 Hz)
Vibration mode 22 (f=827,476 Hz)
Vibration mode 23 (f=831,662 Hz)
Vibration mode 24 (f=868,553 Hz)
Vibration mode 25 (f=979,242 Hz)
Vibration mode 26 (f=983,744 Hz)

TEA Pipe.2

Status of Computation : OK

Vibration mode 1 (f=22,1338 Hz)
Vibration mode 2 (f=24,8053 Hz)
Vibration mode 3 (f=67,4175 Hz)
Vibration mode 4 (f=109,066 Hz)
Vibration mode 5 (f=134,074 Hz)
Vibration mode 6 (f=171,714 Hz)
Vibration mode 7 (f=214,843 Hz)
Vibration mode 8 (f=219,672 Hz)
Vibration mode 9 (f=287,524 Hz)
Vibration mode 10 (f=290,777 Hz)
Vibration mode 11 (f=319,593 Hz)
Vibration mode 12 (f=430,774 Hz)
Vibration mode 13 (f=433,212 Hz)
Vibration mode 14 (f=433,447 Hz)
Vibration mode 15 (f=476,814 Hz)

TEA Pipe.2

Status of Computation : OK

Vibration mode 1 (f=287,524 Hz)
Vibration mode 2 (f=290,777 Hz)
Vibration mode 3 (f=319,593 Hz)
Vibration mode 4 (f=430,774 Hz)
Vibration mode 5 (f=433,212 Hz)
Vibration mode 6 (f=433,447 Hz)
Vibration mode 7 (f=476,814 Hz)
Vibration mode 8 (f=558,258 Hz)
Vibration mode 9 (f=591,097 Hz)
Vibration mode 10 (f=649,624 Hz)
Vibration mode 11 (f=666,645 Hz)
Vibration mode 12 (f=692,436 Hz)

Figura 139. Frecuencias de cada modo de vibración.

Se puede comprobar que de 0 Hz hasta una frecuencia de 500 Hz hay más modos (15 modos) que de 500 Hz a 1000 Hz (11 modos) y que en el rango de frecuencias de [250 Hz ; 750 Hz] se generan menos modos (12 modos) que fuera de este rango (14 modos). También se puede ver que los modos que repiten en los tres rangos de frecuencias tienen justamente la misma frecuencia.

- Bloque 7:

Para la frecuencia: [0 Hz ; 1000 Hz]. Se han generado 168 modos de vibración, los 7 primeros son:

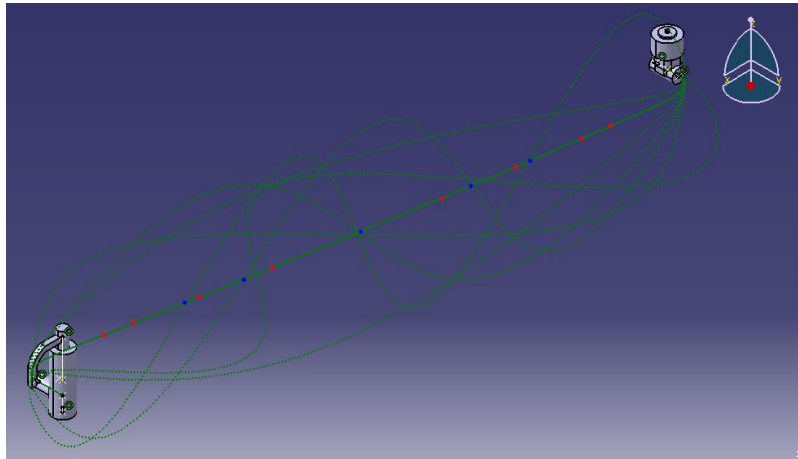


Figura 140. Modos de vibración.

Para la frecuencia: [0 Hz ; 500 Hz]. Se han generado 104 modos de vibración, los 7 primeros son:

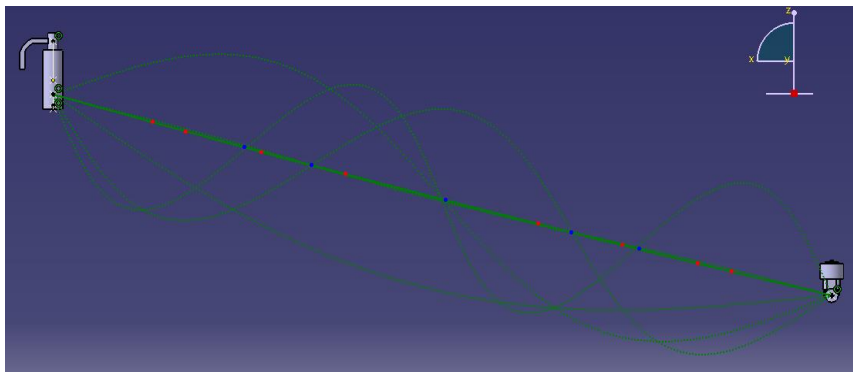


Figura 141. Modos de vibración.

Para la frecuencia: [250 Hz ; 750 Hz]. Se han generado 73 modos de vibración, los 7 primeros son:

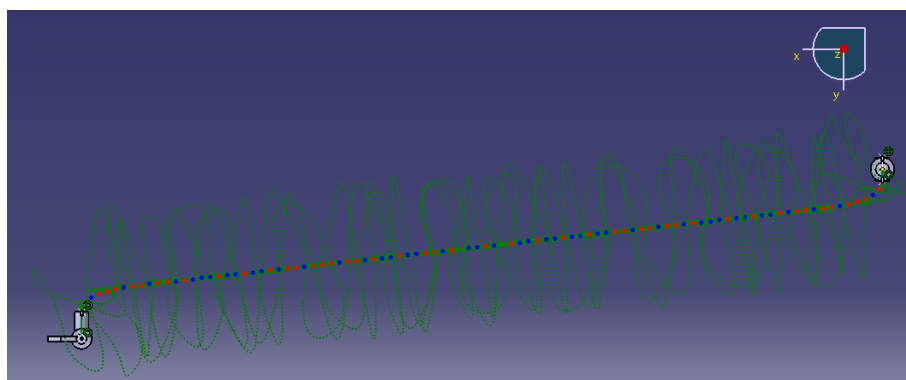


Figura 142. Modos de vibración.

Cabe destacar la forma de los modos de vibración en el rango de frecuencia [250 Hz ; 750 Hz] del bloque 7, los cuales son muy diferentes a los otros resultados tanto del bloque 5 como del bloque 7. Y que al haber más distancia se generan más modos de vibración en este bloque.

Los informes correspondientes a los rangos de las frecuencias seleccionadas se pueden ver en los anexos. En los informes se afirma que sucede exactamente lo mismo que las conclusiones sacadas en el bloque 5.

11.1.4. Análisis de la respuesta armónica

Es un análisis que proporciona la respuesta de un tubo ante una aceleración armónica $A = f$ (frecuencia), de cada frecuencia calculada, se genera un conjunto de curvas siguiendo la trayectoria de la tubería para una frecuencia. Para cada frecuencia calculada se muestra la trayectoria de la tubería. A partir de los datos de la primera simulación, se realiza un análisis casi-estático (para calcular el estado de estrés) y un análisis de la respuesta armónica dentro de un rango de frecuencia y un número de pasos de frecuencia (el análisis tiene en cuenta la configuración de la tensión cuando se realiza el análisis casi-estático).

Se impondrá una aceleración armónica prescrita a los dos conectores. Esta aceleración armónica es un vector de 3 componentes (Acc_X, Acc_Y, Acc_Z) en función de la frecuencia. La aceleración se podrá ver en los anexos y se añadirá en el programa en formato de archivo texto. Debajo se puede ver un ejemplo, la aceleración está en m/s^2 y la frecuencia en Hz.

Frequency	Acceleration_X	Acceleration_Y	Acceleration_Z
50	1.0	2.0	3.0
100	1.5	2.5	4.0
200	2.0	4.0	6.0

Figura 143. Ejemplo aceleración armónica.

El análisis se hará para los bloques 5 y 7. Se utiliza los mismos datos que la primera simulación y se hacen dos ensamblajes iguales que en la anterior simulación. La aceleración armónica que se impondrá a los dos conectores será la misma que el programa tiene como preestablecida.

Después de poner los datos en la pestaña "Pipe Definition" se introduce el archivo acceleration.txt en la pestaña "General" y dentro de "Dynamic". En "Dynamic" se puede ver los datos extraídos y las gráficas de la aceleración armónica en cada eje:

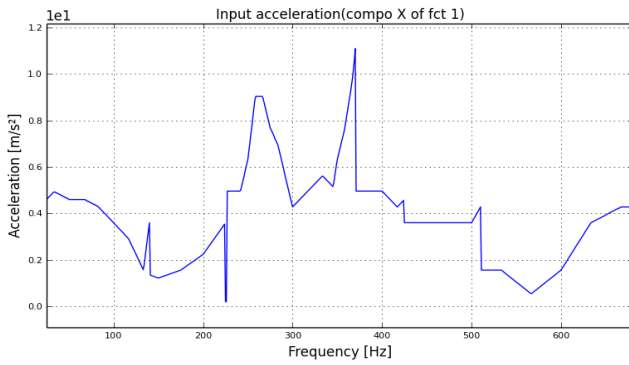


Figura 144. Aceleración eje X.

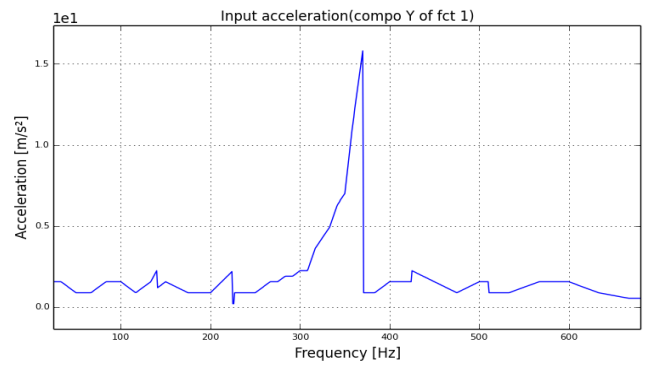


Figura 145. Aceleración eje Y.

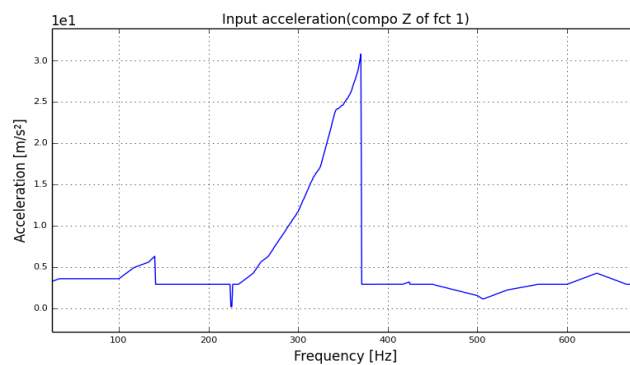


Figura 146. Aceleración eje Z.

Posteriormente, se tienen que unir las aceleraciones con los conectores. Se vuelve a la definición de los dos conectores y se clicca a “Show DOF Excitation” que aparece cuando se introduce el archivo de la función de aceleración. Y se comprueba que todos los grados de libertad estén excitados por la aceleración, como se puede ver en el cuadro dibujado en azul de la imagen de abajo (el cuadro de “Hide DOF Excitation” es para esconder esta opción):

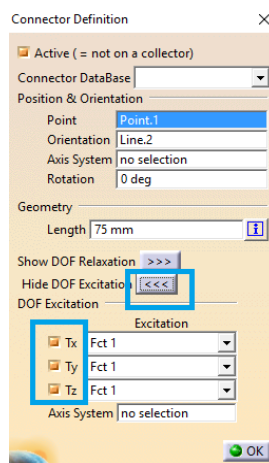


Figura 147. Opción “Show DOF Excitation”.

Finalmente, en la computación de los tubos se selecciona el análisis de respuesta armónica y se introduce un rango de frecuencia de [0 Hz ; 1000Hz] y un 100 de rango de subdivisión (realizará cálculos de las frecuencias cada 10 Hz). Y se realiza la computación.

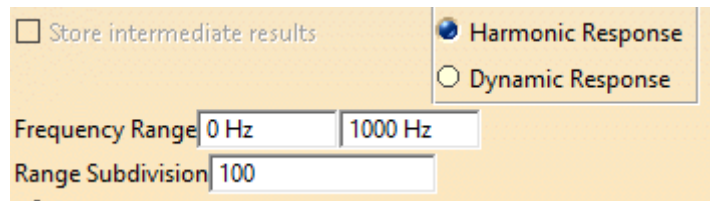


Figura 148. Análisis de respuesta armónica.

Cuando haya acabado la computación, el programa preguntará que frecuencia calculada o frecuencias se quiere ver la trayectoria de la tubería, o en todas. En este caso, se elegirá una frecuencia de 50 Hz y de 350 HZ, con una escala de 100 para poder bien el desplazamiento.

- Bloque 5:

El programa muestra un conjunto de estrías que cubren el desplazamiento de la tubería en la frecuencia de 50 Hz:

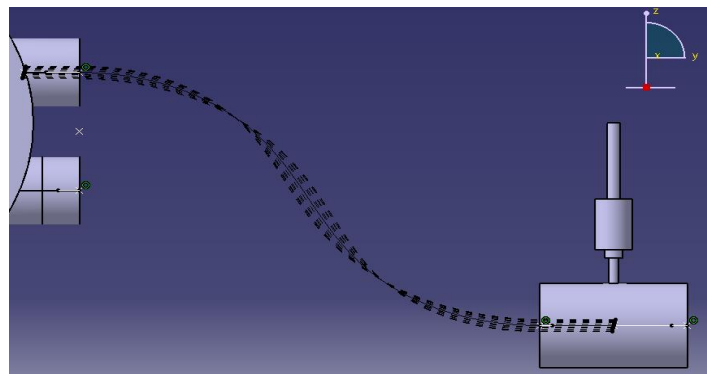


Figura 149. Estrías en la frecuencia de 50 Hz.

También tiene la opción de salir en forma sólida como en la simulación anterior, con la frecuencia de 50 Hz:

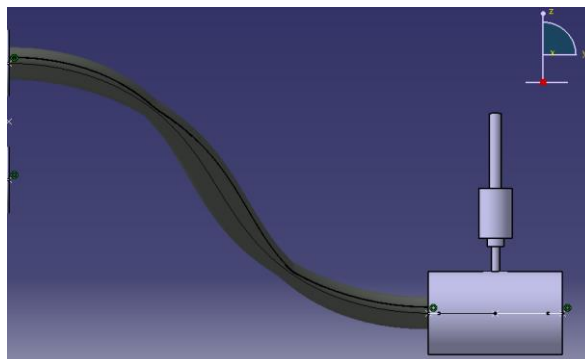


Figura 150. Estrías con la forma sólida.

El desplazamiento con la frecuencia de 350 Hz:

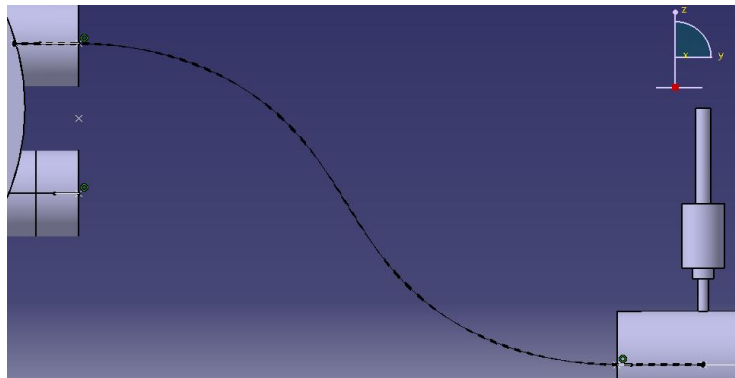


Figura 151. Estrías en la frecuencia de 350 Hz.

Se puede ver que es más pequeño el desplazamiento con la frecuencia de 350 Hz que con 50 Hz.

Se puede concluir que en este bloque cuanto más frecuencia menor es el desplazamiento, a pesar de que la aceleración es mayor para la frecuencia de 350 Hz que para la frecuencia de 50 Hz, como se puede ver en el cuadro de abajo sobre la aceleración armónica en cada frecuencia:

Tabla 12. Aceleración armónica en las dos frecuencias.

Freq(Hz)	Acceleration_X(mm_s2)	Acceleration_Y(mm_s2)	Acceleration_Z(mm_s2)
5.00E+01	4.60E+03	8.80E+02	3.60E+03
3.50E+02	6.32E+03	7.00E+03	2.46E+04

El programa crea también un informe con cada frecuencia, el informe para cada frecuencia no se mostrará por su gran extensión, pero si en las dos frecuencias seleccionadas. En el informe de las frecuencias de 50 Hz y 350 Hz (y de todas) muestra las reacciones de fuerza y de momento y la fuerza de tracción en cada conector, todo esto en cada frecuencia. Estos son los resultados para ambas frecuencias:

Tabla 13. Resultado primer conector de 50 Hz.

		First Connector			
		X	Y	Z	magn
Frecuencia: 50 Hz	Reaction Force (N)	0,0128601	0,00845969	0,00989777	0,0183006
	Reaction Moment (N/m)	0,000281373	1,23007e-006	0,000369003	0,000464043
	Pulling Force (N)				-0,00845969

Tabla 14. Resultados segundo conector de 50 Hz.

Second Connector					
Frecuencia: 50 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,0117832	0,00862801	0,00901037	0,0171602
	Reaction Moment (N/m)	0,000173091	1,20104e-006	0,000241032	0,000296746
	Pulling Force (N)				0,00862801

Tabla 15. Resultados primero conector de 350 Hz.

First Connector					
Frecuencia: 350 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,00768534	0,0325766	0,00914775	0,0346985
	Reaction Moment (N/m)	0,000505197	6,07621e-006	0,00026492	0,000570477
	Pulling Force (N)				-0,0325766

Tabla 16. Resultados segundo conector de 350 Hz.

Second Connector					
Frecuencia: 350 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,00652404	0,0309966	0,00368551	0,0318894
	Reaction Moment (N/m)	0,000575204	6,0931e-006	0,0002055	0,000610841
	Pulling Force (N)				0,0309966

Y el resultado final del informe es el siguiente, el cual muestra la frecuencia que ha tenido la máxima fuerza de reacción que ha sido para la frecuencia de 320 Hz y la máxima fuerza de tracción que ha sido para la frecuencia de 590 Hz, cada una en ambos conectores:

Tabla 17. Resultados final primer conector.

First Connector					
Overall		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	0,543716	0,0407698	0,738905	0,918297
	Max Pulling Force (N)				-0,278994

Tabla 18. Resultados final segundo conector.

Second Connector					
Overall		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	0,553066	0,0130124	0,734819	0,919788
	Max Pulling Force (N)				0,283803

- Bloque 7:

El desplazamiento de la tubería en la frecuencia de 50 Hz:

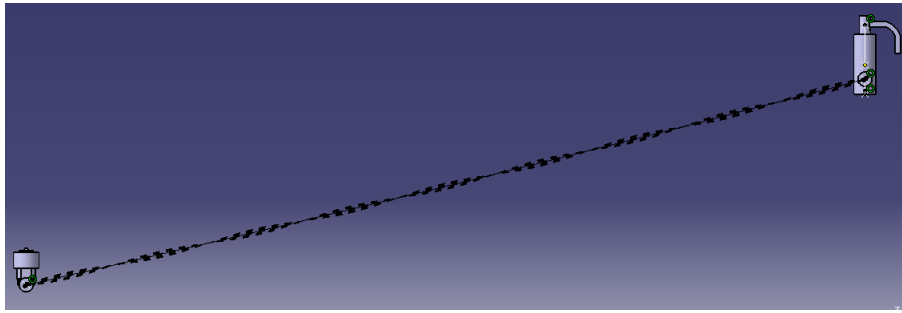


Figura 152. Estrías en la frecuencia de 50 Hz.

El desplazamiento con la frecuencia de 350 Hz:

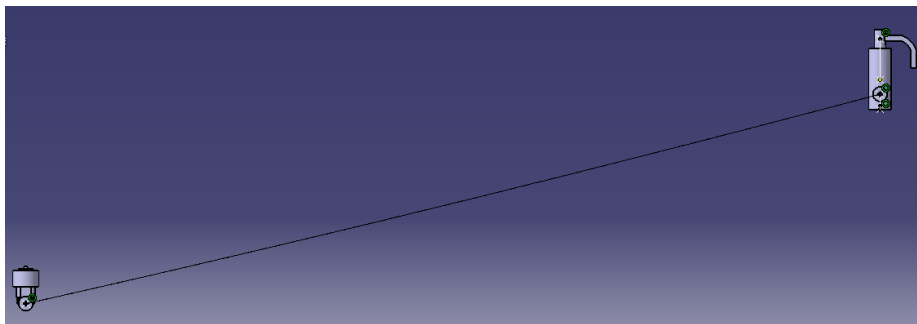


Figura 153. Estrías en la frecuencia de 350 Hz.

Prácticamente no se ve el desplazamiento y en este bloque se ve menos, cuanto más frecuencia menos desplazamiento. Por eso se puede sacar la misma conclusión que en el bloque 5.

En las frecuencias de 50 Hz y 350 Hz muestra el siguiente informe en las tablas de debajo:

Tabla 19. Resultado primer conector de 50 Hz.

		First Connector			
		X	Y	Z	magn
Frecuencia: 50 Hz	Reaction Force (N)	0,0351497	0,016867	0,0148883	0,0417332
	Reaction Moment (N/m)	0,00139182	2,47924e-005	0,00485312	0,00504882
	Pulling Force (N)				-0,016867

Tabla 20. Resultados segundo conector de 50 Hz.

Second Connector					
Frecuencia: 50 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,0396761	0,0161873	0,0129313	0,0447598
	Reaction Moment (N/m)	0,000896712	3,14386e-005	0,00333911	0,00345756
	Pulling Force (N)				0,0161873

Tabla 21. Resultado primer conector de 350 Hz.

First Connector					
Frecuencia: 350 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,00341103	0,00926664	0,0451229	0,0461907
	Reaction Moment (N/m)	0,00180048	2,82403e-005	0,00010153	0,00180356
	Pulling Force (N)				- 0,00926664

Tabla 22. Resultados segundo conector de 350 Hz.

Second Connector					
Frecuencia: 350 Hz		X	Y	Z	magn
	Reaction Force (N)	0,000295004	0,0140015	0,0247841	0,0284671
	Reaction Moment (N/m)	0,000481647	2,70569e-005	2,89023e-005	0,000483271
	Pulling Force (N)				0,0140015

Y el resultado final del informe es el siguiente, la máxima fuerza de reacción y de tracción ha sido para la frecuencia de 290 Hz en ambos conectores.

Tabla 23. Resultados final primer conector.

First Connector					
Overall		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	1,94535	1,44653	0,528698	2,4812
	Max Pulling Force (N)				-1,44653

Tabla 24. Resultados final segundo conector.

Second Connector					
Overall		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	1,96233	1,86499	0,462874	2,74649
	Max Pulling Force (N)				1,86499

Se destaca que en las frecuencias que ha habido la máxima fuerza de reacción y de tracción en cada bloque es muy superior a la mayoría de las otras fuerzas de cada frecuencia. Con hasta una escala o algo mayor de 100 N de diferencia, como se puede ver entre las magnitudes de las frecuencias de 350 Hz y de 290 Hz con los resultados finales en el bloque 7.

Las gráficas de cada bloque se podrán ver en los anexos. Son doce gráficas las que muestra el programa:

- Traslado o desplazamiento (promedio en el tubo): representa el desplazamiento promedio a lo largo de la tubería para todas las frecuencias calculadas. En el eje Y es el desplazamiento medio a lo largo de la tubería y en el eje X es la frecuencia. Se puede ver un mayor traslado en el bloque 7 que en el bloque 5 en las primeras frecuencias (hasta 400Hz), después es prácticamente 0 en ambos casos.
- Traslado o desplazamiento (en todo el tubo): representa el desplazamiento a lo largo de la tubería para todas las frecuencias calculadas. En el eje Y es el desplazamiento y en el eje X es la posición a lo largo de la tubería. También se ve un mayor traslado en el bloque 7 que en el bloque 5. En el bloque 5 el desplazamiento es mayor y con más dispersión en la parte central del tubo. En el bloque 7 el desplazamiento es más constante por todo el tubo y hay menos dispersión en general.
- Traslado o desplazamiento del primer y segundo conector: representa el desplazamiento del primer y segundo conector para todas las frecuencias calculadas. En el eje Y es el desplazamiento de cada conector y en el eje X es la frecuencia. Los desplazamientos de ambos bloques son similares en ambos conectores y se produce un desplazamiento mayor en las primeras frecuencias, posteriormente es prácticamente cero.
- Rotación del primer y segundo conector: el mismo caso que el traslado de los dos conectores, pero con la rotación en el eje Y. La rotación es menor en el bloque 5 que en el bloque 7. La rotación es grande y variable hasta aproximadamente la frecuencia de 600 Hz, después es prácticamente nula. También se puede ver que en el bloque 7, la rotación llega a ser mayor en el primer conector que en el segundo.
- Momento de reacción del primer y segundo conector: representa la reacción del momento en el primer y segundo conector para todas las frecuencias calculadas. En el eje Y muestra la reacción del conector de la tubería y en el eje X es la frecuencia. El momento de reacción es mayor en el bloque 7 que en el bloque 5. En el bloque 5 los momentos de reacción son grandes y variables hasta la frecuencia de 600 Hz y en el bloque 7 hasta 400 Hz, posteriormente es prácticamente cero.
- Fuerza de reacción del primer y segundo conector: el mismo caso que el momento de reacción de los dos conectores, pero con la fuerza de reacción en el eje Y. La fuerza de reacción en el bloque 5 es menor que en bloque 7. Al igual que en el caso anterior, la fuerza de reacción es

grande y variable hasta algo más de la frecuencia de 600Hz en el bloque 5 y hasta 400Hz en el bloque 7, posteriormente es prácticamente nula.

- Aceleración del primer y segundo conector: representa la aceleración del primer y segundo conector para todas las frecuencias calculadas. En el eje Y muestra la aceleración del conector de la tubería y en el eje X es la frecuencia. En ambos bloques la aceleración es la misma en cada conector. Tienen aceleración variable hasta aproximadamente 700Hz, posteriormente es nula.

En los gráficos que hay del primer y segundo conector se puede ver que los resultados son prácticamente similares entre ambos conectores en los dos bloques, excepto en el de rotación y en del momento y fuerza de reacción que varían un poco, sobretodo en la magnitud.

11.1.5. Análisis de la respuesta dinámica

El análisis de la respuesta dinámica se realizará a partir de imponer un desplazamiento transitorio en el eje x sobre el primer conector de los bloques 5 y 7. Se puede introducir tanto un desplazamiento transitorio como una aceleración transitoria. El desplazamiento depende de esta fórmula:

$$Disp_X(t) = 10 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (24 \cdot e^{(-\frac{t}{2})} + 16 \cdot t)) \quad (6)$$

En este análisis se generan los tubos deformados obtenidos para cada uno de los pasos transitorios calculados. Proporciona la respuesta de un tubo a una excitación dinámica compuesta por un desplazamiento transitorio. En esta simulación se requiere las mismas entradas que en el análisis casi-estático y se realiza tanto el análisis casi-estático para calcular el estado de estrés y el análisis de transitorio dinámico, también tiene en cuenta la configuración de la tensión obtenida durante el análisis casi-estático y el efecto de la inercia.

En el efecto de inercia, para la amortiguación del material el programa utiliza la ley Kelvin:

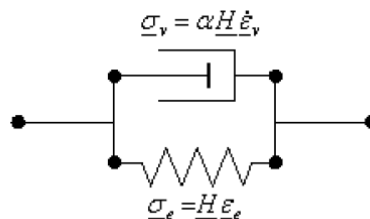


Figura 154. Ley Kelvin.

El coeficiente de amortiguación del material se proporciona en la base de materiales.

El desplazamiento tiene el mismo formato que la aceleración armónica de la anterior simulación. Con la diferencia que es un desplazamiento en un solo vector (Disp_X) y en función del tiempo (en segundos). El desplazamiento

es el preestablecido por el programa y se podrá ver en los anexos. También se añadirá en el programa en formato de archivo texto. Un ejemplo del desplazamiento, en segundos el tiempo y en metros la distancia:

Time	Displacement_X	Displacement_Y	Displacement_Z
50	1.0	2.0	3.0
100	1.5	2.5	4.0
200	2.0	4.0	6.0

Figura 155. Ejemplo del desplazamiento.

Después de volver a crear los dos ensamblajes de los bloques 5 y 7 con los mismos datos que las anteriores simulaciones. Se introduce el archivo de texto llamado "displacement" de la misma forma que en el análisis de la respuesta armónica. Se puede ver los datos extraídos y su gráfico del desplazamiento en el eje X (en el eje Y y Z son nulos):

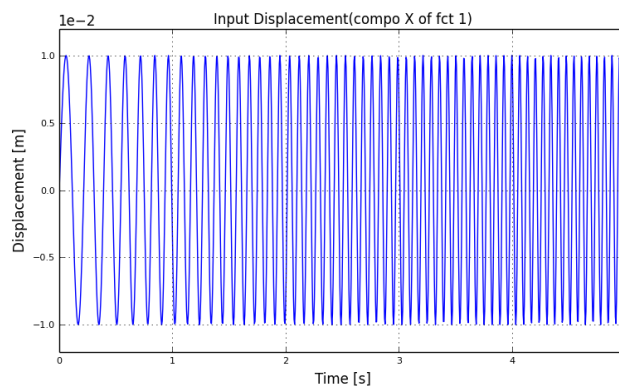


Figura 156. Desplazamiento en el eje X.

Seguidamente se une el desplazamiento en el primer conector en la opción "Show DOF Excitation" y se comprueba que solo el grado de libertad en el eje X está excitado por el desplazamiento de la misma forma que en la anterior simulación (se podría desplazar los dos conectores).

Por último, se vuelve al ensamblaje y en la computación de los tubos se selecciona el análisis de respuesta dinámica y se realiza los cálculos.

Cuando se han realizado los cálculos, el programa no hace ninguna variación en la visualización en 3D para mostrar el resultado, pero sí que extrae unos informes y unos gráficos.

El informe que se muestra es de una gran extensión, por eso se explicará los detalles del informe y se mostrará una parte de ellos y los resultados totales.

- En el bloque 5:

En el primer informe se puede ver como el programa muestra como varía el radio geométrico de la curva y el ángulo de torsión en relación con el tiempo. Cada 0,005 segundos muestra un dato de ambos, como se puede ver en la imagen de abajo:

	Geometrical Curve Radius	Torsion Angle (per unit of length)
Time 0	97,7003 > 30 (mm)	-1,13179 > -100 (deg/m)
Time 0,005	97,6906 > 30 (mm)	-1,133 > -100 (deg/m)
Time 0,01	99,2693 > 30 (mm)	-0,381872 > -100 (deg/m)
Time 0,015	101,841 > 30 (mm)	0,524001 < +100 (deg/m)
Time 0,02	103,105 > 30 (mm)	0,897193 < +100 (deg/m)
Time 0,025	104,643 > 30 (mm)	-1,12056 > -100 (deg/m)
Time 0,03	105,633 > 30 (mm)	-1,78296 > -100 (deg/m)
Time 0,035	105,408 > 30 (mm)	-3,12719 > -100 (deg/m)
Time 0,04	105,586 > 30 (mm)	-4,31553 > -100 (deg/m)
Time 0,045	105,466 > 30 (mm)	-4,64168 > -100 (deg/m)
Time 0,05	105,189 > 30 (mm)	-4,50625 > -100 (deg/m)
Time 0,055	105,714 > 30 (mm)	-3,91852 > -100 (deg/m)
Time 0,06	104,551 > 30 (mm)	-3,10031 > -100 (deg/m)

Figura 157. Resultados cada 0,005 segundos del primer informe.

Así hasta que completa los 5,005 segundos y el programa concluye con unos resultados finales o totales (overall):

Time 4,99	72,5354 > 30 (mm)	-4,15824 > -100 (deg/m)
Time 4,995	75,1475 > 30 (mm)	1,97134 < +100 (deg/m)
Time 5	81,8252 > 30 (mm)	7,76407 < +100 (deg/m)
Time 5,005	86,1823 > 30 (mm)	10,2219 < +100 (deg/m)
Overall	64,4467 > 30 (mm)	-34,117 > -100 (deg/m)

Figura 158. Resultados finales o totales del primer informe.

En los resultados finales muestra que el radio geométrico final del tubo es superior a los 30 mm como mínimo exigidos, y que también cumple el ángulo de torsión al ser inferior de los -100 deg/m exigidos. Para el radio verifica el instante con el radio más pequeño, ese es el tiempo 4,18 segundos con el radio de 64,4467 mm. Y para la torsión escoge el número más grande sin tener en cuenta si es negativo o positivo, en este caso el -34,117 deg/m se ha producido en el instante 3,655 segundos.

En el segundo informe presenta los resultados de las reacciones de fuerza y de momento y la fuerza de tracción en cada conector en función del tiempo. La segunda columna es el primer conector y la tercera y última es el segundo conector. Este tiempo también varía cada 0,005 segundos hasta los 5,005 segundos y concluye con unos resultados totales o finales. Los resultados finales que encontramos son estos, los cuales muestran las reacciones de fuerza y las fuerzas de tracción máximas en el instante que ha sucedido:

Time		X				Y				Z				magn				
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Time 4,995	Reaction Force (N)	-1,57738	-0,91955	-1,35224	2,27206	1,99271	0,584663	1,19334	2,15201	0,236985	-0,000496515	-0,33656	0,411825	0,584663				
	Reaction Moment (N/m)	0,276532	0,000492187	-0,360948	0,454702													
	Pulling Force (N)				0,91955									0,584663				
Time 5	Reaction Force (N)	-0,767548	-1,30096	-0,911434	1,76419	1,26503	1,31047	0,667511	1,9399	0,202138	-0,00218831	-0,321938	0,380142	1,31047				
	Reaction Moment (N/m)	0,245596	0,00221315	-0,282268	0,374162													
	Pulling Force (N)				1,30096									1,31047				
Time 5,005	Reaction Force (N)	0,0611954	-1,88282	-0,245679	1,89977	0,548143	2,16578	0,130774	2,23789	0,171298	-0,0029755	-0,284005	0,331678	2,16578				
	Reaction Moment (N/m)	0,192086	0,00298462	-0,201511	0,278411													
	Pulling Force (N)				1,88282									2,16578				
Overall	Max Reaction Force (N)	2,1645	-3,54572	1,2656	4,34289	-1,53804	3,66144	-1,14078	4,13195									
	Max Pulling Force (N)				3,59358				3,66144					3,66144				

Figura 159. Resultados finales o totales.

Estos instantes han sido los 0,06 segundos para la reacción de fuerza máxima en ambos conectores, para el tiempo 3,585 segundos en la fuerza

máxima de tracción del primer conector y el tiempo 2,69 segundos en el segundo conector.

- Bloque 7:

Los resultados finales del primer informe:

Overall	41,989 > 30 (mm)	17,7709 < +100 (deg/m)
---------	------------------	------------------------

Figura 160. Resultados finales o totales del primer informe.

El radio mínimo ha sucedido en el instante de 4 segundos exactos y el valor más grande de torsión ha sido en el tiempo de 4,99 segundos.

Se puede ver que también cumple las medidas mínimas exigidas. El radio geométrico de la curva es más grande en el bloque 5 que en el 7 y el ángulo de torsión es negativo en el bloque 5 mientras que en el 7 es positivo.

Los resultados finales o totales del segundo informe:

Overall		X	Y	Z	magn		X	Y	Z	magn
	Max Reaction Force (N)	53,7744	1,94392	8,26711	54,4409		-28,8422	-7,05416	-8,48519	28,5013
	Max Pulling Force (N)				-8,33783					-8,04229

Figura 161. Resultados finales o totales del segundo informe.

Estos resultados han sucedido en el instante 3,94 segundos para la reacción de fuerza máxima en ambos conectores y para el tiempo 3,005 segundos en la fuerza de tracción máxima en el primer conector y en el segundo conector en los instantes 3,435 segundos y 3,595 segundos.

Los gráficos de cada bloque se podrán ver en los anexos, en cada bloque se genera ocho gráficos:

- Traslado o desplazamiento (promedio en el tubo): representa el desplazamiento promedio a lo largo del tubo para todos los pasos de tiempo calculados. En el eje Y es el desplazamiento promedio a lo largo de la tubería y en el eje X es el tiempo. Se puede percibir que en el bloque 5 el traslado es muy constante en el tiempo, aunque aumenta ligeramente a partir de los 2,5 segundos aproximadamente. Y en el bloque 7 el traslado es muy pequeño en los primeros segundos, pero aumenta de una forma constante desde los 2 segundos hasta los 4 segundos, a partir del cuarto segundo se vuelve a reducir. El rango es similar en ambos, pero el desplazamiento promedio máximo es más grande en el bloque 7 que en el bloque 5.
- Traslado o desplazamiento (en todo el tubo): representa el desplazamiento a lo largo del tubo para todos los pasos de tiempo calculados. En el eje Y es el desplazamiento y en el eje X es la posición a lo largo de la tubería. Se puede ver un mayor desplazamiento en la parte central del tubo que en los extremos, aunque en el bloque 7 es más regular el desplazamiento en todo el tubo excepto cerca de los conectores donde es nulo. En el bloque 5 se destaca que hay un cierto desplazamiento en el primer conector y cerca de este. El traslado en

general es más grande en el bloque 7 aunque el rango de desplazamiento parece más grande en el bloque 5.

- Traslado o desplazamiento en el primer y segundo conector: representa el desplazamiento del primer y segundo conector para todos los pasos de tiempo calculados. En el eje Y es el desplazamiento del primer y segundo conector y en el eje X es el tiempo. El traslado en el segundo conector en cada bloque es fijo en todo el tiempo y es mayor en el bloque 7. En el primer conector, que es donde se aplica el desplazamiento, su traslado es muy variante en los cinco segundos. En ambos bloques el rango del desplazamiento es entre 10mm y 0mm.
- Momento de reacción en el primer y segundo conector: representa el momento de reacción en el primer y segundo conector. En el eje Y es la reacción en el primer y segundo conector de la tubería y en el eje X es el tiempo. La reacción en cada conector del bloque 5 es muy variable, pero es constante esta variabilidad durante los cinco segundos. En el bloque 7 en ambos conectores es poco variable hasta los 2 segundos, pero luego aumenta considerablemente sobretodo en el segundo conector, en el primero parece que tiene menor variación, aunque el rango es mayor. Los momentos de reacción son mayores en el bloque 7 que en el bloque 5.
- Fuerza de reacción en el primer y segundo conector: es el mismo caso que el anterior, pero con la fuerza de reacción. En el bloque 5 la variación de la reacción es muy constante en ambos conectores. En cambio, la variación en el bloque 7 es muy parecida al caso anterior en cada conector. También las fuerzas de reacción son mayores en el bloque 7 que en el bloque 5.

CAPÍTULO 12:

AYUDAS Y

SUBVENCIONES

PARA EL USO DE GNV

Hay varias ayudas o subvenciones a nivel estatal y a nivel autonómico para la compra y utilización de vehículos a gas natural. Las ayudas estatales que están en vigor según la página de GASNAM son:

- Plan MOVEA: es un plan aprobado en el 27 de noviembre de 2014 por el consejo de ministros llamado "Plan de Impulso a la Movilidad con Vehículos de Energías Alternativas". Son ayudas por un importe total de 2.000.000 euros para la adquisición de vehículos propulsados por Gas Natural Comprimido (GNC).
- Reducción sobre el IRPF para vehículos eficientes: hay una reducción del 20% sobre el IRPF en el caso de vehículos profesionales que se consideran como eficientes energícamente al cumplir los límites de la Euro 6 y que puedan utilizar combustibles alternativos como el gas natural.
- Programa de incentivos al vehículo eficiente (Pive-8): el plan tiene una dotación total presupuestaria de 175 millones de euros para la adquisición de vehículos nuevos de las categorías M1 y N1 eficientes. En este no está en vigor porque caduco el 31 de julio de 2016.

Las ayudas en las comunidades autónomas no se detallarán cada una, pero si destacar que hay ayudas en las comunidades de; Madrid, Cataluña, País Vasco, Valencia, Castilla-La Mancha, Galicia e Islas Baleares.

A parte de las ayudas, hay unas reducciones de impuestos que son las siguientes:

- Reducción de VED: hay una reducción de impuestos para los vehículos a gas natural.
- Exención del impuesto por congestión: está reconocido que, por sus emisiones bajas, los vehículos de gas natural están exentos de pagar impuestos por congestión si son aplicables.

Y en ocasiones se puede financiar la remodelación del motor Diésel a Dual-Fuel.

CAPÍTULO 13:

PRESUPUESTO

13.1. Amortización de la inversión

Se va a realizar un pequeño estudio de cuantos kilómetros o días son necesarios para amortizar la inversión de cambiar un motor Diésel a un motor Dual-Fuel. Los datos que se utilizarán son los siguientes y donde se han extraído:

- Inversión = 13.500€ (según la información de la empresa Evarm, se ha elegido un valor promedio).
- Recorrido camión cada día = 380Km/día (<http://www.encamion.com/node/36364>).
- Consumo diésel de un camión = 30,19l/100km = 0,3019 l/km (<http://www.transporteprofesional.es/>).
- Consumo GNL de un camión = 22,9 Kg/100km = 0,229 Kg/km (<http://www.encamion.com/node/36364>, camión solo con gas).
- Coste diésel = 0,969€/l (Apartado 7.1, información empresa autobuses de Madrid).
- Coste GNL = 0,69€/kg (<http://www.transporteprofesional.es/>).
- Consumo del 50% tanto del diésel como del GNL según la empresa Evarm.

Lo primero que se va a calcular es el beneficio por día que tiene la utilización del Dual-Fuel comparado con el diésel. Antes hay que calcular el consumo diario:

- Consumo diésel: $\frac{0,3019l}{km} \cdot \frac{380km}{día} = 114,722l/día$
- Consumo GNL: $\frac{0,229kg}{km} \cdot \frac{380km}{día} = 87,02kg/día$

El consumo del motor Diésel y Dual-Fuel cada día será:

- Consumo motor Diésel: 114,722l/día
- Consumo motor Dual-Fuel (50% diésel y 50% GNL): 57,361l/día + 43,51kg/día

Y calcular el coste de ambos motores al día.

- Coste motor Diésel: $\frac{114,722l}{día} \cdot \frac{0,969€}{l} = 111,16€/día$
- Coste motor Dual-Fuel:
 - Diésel: $\frac{57,361l}{día} \cdot \frac{0,969€}{l} = 55,58€/día$
 - GNL: $\frac{43,51kg}{día} \cdot \frac{0,69€}{kg} = 30,02€/día$

Coste total del motor Dual-Fuel es de $55,58 + 30,02 = 85,6€/día$

Por tanto, el ahorro utilizando el motor Dual-Fuel es de $111,16 - 85,6 = 25,56€/día$. Es un ahorro de combustible cada día considerable.

Teniendo en cuenta que la inversión es de 13.500€ se calcula los días necesarios para amortizar la inversión:

$$13500€ \frac{día}{25,56€} = 528,17 \text{ días}$$

Este resultado equivale a un año y 164 días.

También se puede calcular los kilómetros recorridos necesarios para amortizar la inversión sin tener en cuenta los kilómetros que hace al día el camión.

El consumo del motor Diésel y Dual-Fuel por km será:

- Consumo motor Diésel: 0,3019 l/km
- Consumo motor Dual-Fuel (50% Diésel y 50% GNL):
 - $0,3019l/km \cdot 0,5 = 0,151l/km$
 - $0,229kg/m \cdot 0,5 = 0,1145kg/km$

El coste del motor Diésel y Dual-Fuel por km será:

- Coste motor Diésel: $\frac{0,3019l}{km} \cdot \frac{0,969€}{l} = 0,292€/km$
- Coste motor Dual-Fuel:
 - $\frac{0,151l}{km} \cdot \frac{0,969€}{l} = 0,146€/km$
 - $\frac{0,1145kg}{km} \cdot \frac{0,69€}{kg} = 0,079€/km$

El coste total del motor Dual-Fuel es de $0,146 + 0,079 = 0,225€/km$

Por tanto, el ahorro utilizando el motor Dual-Fuel es de $0,292 - 0,225 = 0,067$ €/km.

Teniendo en cuenta que la inversión es de 13.500€ se calcula los kilómetros necesarios para amortizar la inversión:

$$13500\text{€} \frac{\text{km}}{0,067\text{€}} = 201.492,54\text{km}$$

La distancia necesaria es de 201.492,54km. Si se quiere comprobar el resultado con los días necesarios a partir del recorrido:

$$\frac{201.492,54\text{km}}{380\text{km/día}} = 530,24 \text{ días}$$

El resultado es 530,24 días, similar a los 528,17 días del cálculo anterior.

En definitiva, los resultados son 201.492,54km o 530 días para amortizar la inversión. Es viable para cualquier camión que haga largos recorridos y que aún tenga una vida útil de como mínimo tres años (contando la amortización y los posteriores beneficios).

13.2. Coste elaboración del proyecto

El coste de elaboración del proyecto se ha dividido por las etapas que se han seguido para completarlo.

Las etapas son:

- Búsqueda bibliográfica.
- Instalación programas.
- Aprendizaje programa CATIA.
- Aprendizaje programa LMS Samtech TEA PIPE.
- Estudio componentes del modelo.
- Diseño 3D.
- Realización planos.
- Simulaciones.
- Cálculo amortización.
- Redacción memoria.

Se ha elegido un coste del trabajador de 15€/h, el proyecto duró 7 meses y cada mes tiene 160 horas de trabajo. A partir de las etapas se muestra en la tabla 25 los costes totales.

Tabla 25. Coste por etapa y total

Etapa	Tiempo (h)	Coste trabajador (€/h)	Coste total (€)
Búsqueda bibliográfica	180	15	2.700
Instalación programas	220	15	3.300
Aprendizaje programa CATIA	60	15	900
Aprendizaje programa LMS Samtech TEA PIPE	60	15	900
Estudio componentes del modelo	80	15	1.200
Diseño 3D	110	15	1.650
Realización planos	15	15	225
Simulaciones	80	15	1.200
Cálculo amortización	5	15	75
Redacción memoria	310	15	4.650
Total sin IVA	1.120		16.800
IVA			21%
Total con IVA			20.328

El coste total de la elaboración del proyecto son 20.328€.

CAPÍTULO 14:

CONCLUSIONES

Se ha podido ver cómo afectan los gases contaminantes tanto a los humanos como a las diferentes especies, así como al medioambiente. También se ha constatado la importancia de cumplir las nuevas normativas europeas en esta materia, así como endurecerlas en un futuro. Una movilidad sostenible es el objetivo a cumplir entre todos, y es necesario que a nivel nacional se realice una nueva estrategia de movilidad sostenible más actual y con carácter de obligatoriedad.

En una segunda parte a través de la descripción de los sistemas Diésel y Dual-Fuel, se ha podido observar la importante mejora que se obtiene con el sistema Dual-Fuel ante todo centrándonos en el transporte pesado.

El sistema Dual-Fuel se va implantando por el buen camino tanto en Europa como en nuestro país, no obstante, queda patente la necesidad de más medidas y recursos para acabar de implantar dicho sistema.

Se han podido conocer con detalle los componentes de dicho sistema, su funcionamiento y el objetivo de cada uno de ellos, y así se ha diseñado un modelo generalizado que podría aplicarse a cualquier tipo de camión con sistema Dual-Fuel.

En una tercera parte, tras la utilización de los programas LMS SAMTECH TEA PIPE y CATIA, cabe destacar que se ha presentado una importante multifuncionalidad y complejidad. Únicamente se ha utilizado una pequeña parte de sus funcionalidades para el trabajo, de ahí que en el futuro se pueda ampliar dicho trabajo utilizando nuevos sistemas de estos dos software.

Los resultados obtenidos en las conclusiones son muy abiertos. La gran cantidad de información extraída en cada simulación es útil para cualquier

experto en las materias del estudio del modo de vibración y de las respuestas armónicas y dinámicas.

Durante el proceso de realización del trabajo se han encontrado problemas y facilidades a la vez. La dificultad en la instalación del programa fue muy compleja, también surgieron importantes problemas al realizar las simulaciones con los softwares, y la búsqueda de información de los modelos Dual-Fuel, por lo que se ha ralentizado la correcta evolución del trabajo.

Por otra parte, se ha podido observar la facilidad en el aprendizaje del manejo de ambos programas. Por ello debo constatar que he podido adquirir una importante formación en el manejo de dichos programas, lo cual me será de gran utilidad para mi futuro desarrollo profesional.

En definitiva, el aprendizaje en la realización de este trabajo ha sido muy extenso en diversas materias diferentes, pero con una relación entre todas. Un aprendizaje que seguro será útil para un futuro más o menos cercano.

CAPÍTULO 15:

BIBLIOGRAFÍA

17.1. Referencias bibliográficas

- Agrupasuma. "Dual-Fuel: Diésel gas". Conversión de motores diésel a gas natural/GLP. (2016 [Citado el 10 de setembre de 2016]): disponible en <http://agrupasuma.com/page/motores-a-gas-glp>
- Azimadli. "Modo de vibración". Introducción al análisis de vibraciones (2009 [Citado el 11 de setiembre de 2016]): disponible en <http://azimadli.com/vibman-spanish/mododevibracin1.htm>
- Dieselnet. Regulatory Framework. Heavy-Duty Truck and Bus Engines (2016 [Citado el 25 de setiembre de 2016]): disponible en <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>
- EMT. PDF Resumen de ensayos. (2014 [Citado el 13 de marzo de 2016]).
- EMT. PDF Combustión compartida Diésel-GNC. (2014 [Citado el 13 de marzo de 2016]).
- ENCAMION. "Prueba consumo Scania G 340 Streamline GNL". Probamos 30 toneladas con GNL en ruta nacional. (2016 [Citado el 2 de octubre de 2016]): disponible en <http://www.encamion.com/node/36364>
- EVARM. "Empresa Dual-Fuel EVARM". (2016 [Citado el 30 de mayo de 2016]): disponible en <http://www.evarm.com/>
- Fundación Eduardo Barreiros. "Biografía Eduardo Barreiros". (2016 [Citado el 5 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.fundacionbarreiros.com/es/barreiros/biografia.html>
- Gas Natural Fenosa. "Instalación gas natural vehicular". Gas Natural Vehicular – GNV. (2016 [Citado el 5 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/gas+natural+vehicular+%E2%80%93+gnv/1297102601118/instala+gas+natural+vehicular+.html>
- Jiménez Herrero, Luis M. (2010). "Transporte y movilidad, claves para la sostenibilidad". Transportes. (2010 [Citado el 17 de marzo de 2016] Fundación General CSIC):

- disponible en http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/transporte_movilidad_claves_para_la_sostenibilidad
- Macià, Jaume. "II CONGRESO GAS NATURAL PARA LA MOVILIDAD". Aplicaciones y experiencias del gas natural en el sector terrestre. (2013 [Citado el 7 de julio de 2016] GASNAM): disponible en <http://gasnam.es/wp-content/uploads/2013/10/Vicepresidente-Terrestre-ROS-ROCA.pdf>
- Mecánica Diesel. "Partes del motor diesel y sus funciones". (2013 [Citado el 3 de junio de 2016]): disponible en <http://mecanicadiesellive.blogspot.com.es/p/textos.html>
- NGVA. "NGVA". (2016 [Citado el 7 de junio de 2016]): disponible en <https://www.ngva.eu/the-ngva-focus>
- Norman, Emma. "Como citar en estilo Chicago". Técnica de referencia para la elaboración correcta de notas a pie de página y bibliografías. (2009 [Citado el 27 de setiembre de 2016] INTEC): disponible en https://www.intec.edu.do/downloads/pdf/biblioteca/010-biblioteca_manual_chicago.pdf
- Red ciudad es clima. "La estrategia Española de Movilidad Sostenible y los Gobiernos Locales". Documento apoyo a la estrategia de movilidad sostenible. (2010 [Citado el 13 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.redciudadesclima.es/files/documentacion/2a7fb70e4f9cfd19fbd05d0240327b0.pdf>
- SCANIA. Programa Multi SACNIA. (2016 [Citado el 17 de julio de 2016]).
- Seddon, Don. El Motor diésel, sin problemas. Barcelona: Noray 2006.
- SIEMENS. "LMS Samtech". (2016 [Citado el 4 de febrero de 2016]): disponible en http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/samtech/
- SIEMENS. PDF LMS Samtech Tea Pipe Users Guide. (2016 [Citado el 16 de setiembre de 2016]).
- Swagelok. "Catálogo tubos empresa Swagelok". Datos de tubo. (2016 [Citado el 6 de setiembre de 2016]): disponible en <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/es/MS-01-107.PDF>
- Traceparts. "Descargar piezas en 3D". (2016 [Citado el 5 de setiembre de 2016]): disponible en <http://www.tracepartsonline.net/>
- Transporteprofesional. "Pruebas y test de consumo de camiones". (2016 [Citado el 2 de octubre de 2016]): disponible en <http://www.transporteprofesional.es/noticias/revista-pruebas-camion-furgoneta-industrial>

17.2. Bibliografía de Consulta

- Areatecnologia. "¿Qué es un Manómetro?". Manómetro. (2013 [Citado el 2 de setiembre de 2016]): disponible en <http://www.areatecnologia.com/herramientas/manometro.html>
- Bañon, David. "¿Diésel o gasolina? El petróleo y sus derivados". (2015 [Citado el 23 de marzo de 2016] VIX): disponible en <http://www.batanga.com/curiosidades/4251/diesel-o-gasolina-el-petroleo-y-sus-derivados>
- Bartolome. "Obtención de las vistas de un objeto". (2015 [Citado el 6 de setiembre de 2016] Dibujotecnico): disponible en <http://www.dibujotecnico.com/obtencion-de-las-vistas-de-un-objeto/>
- Carburagas. (2013). "¿Qué es el Gas Natural Comprimido (GNC)?". (2013 [Citado el 19 de junio de 2016]): disponible en <http://carburagas.com.mx/productos-gas-natural/que-es-el-gas-natural-comprimido-gnc/>
- Cejalvo Lapeña, Antonio. "Válvulas de seguridad: características técnicas". (2014 [Citado el 5 de setiembre de 2016] INSHT): disponible en

- http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_342.pdf
- Consumer Energy Center. "Compressed Natural Gas (CNG) as a Transportation Fuel". Transportation. (2015 [Citado el 11 de junio de 2016]): disponible en <http://www.consumerenergycenter.org/transportation/afvs/cng.html>
- DASSAULT SYSTEMES. "Programa CATIA". (2016 [Citado el 12 de febrero de 2016]): disponible en <http://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>
- EMT. PDF Combustión compartida Diésel-GNC. (2014 [Citado el 13 de marzo de 2016]).
- EVARM. "Empresa Dual-Fuel EVARM". (2016 [Citado el 30 de mayo de 2016]): disponible en <http://www.evarm.com/>
- Fernandez, Antonio. "Diferencias entre GNL y GNC". (2016 [Citado el 17 de junio de 2016] Gas vehicular): disponible en <http://www.gasvehicular.es/diferencias-entre-gnl-y-gnc/>
- Gas Natural Fenosa. "Gas natural vehicular: la alternativa más ecológica a los combustibles tradicionales". Vehículos a gas. (2016 [Citado el 6 de junio de 2016]): disponible en <http://www.gasnaturalfenosa.es/es/conocenos/eficiencia+y+bienestar/en+el+transporte/1297154960697/vehiculos+a+gas.html>
- Gas Natural Fenosa. "Vehículos con gas natural". (2016 [Citado el 6 de junio de 2016]): disponible en http://www.gasnaturalfenosa.es/es/Empresas/Soluciones_y_eficiencia_energetica/Soluciones_de_movilidad/Vehiculos_con_gas_natural.html
- GASNAM. "Asociación Ibérica de gas natural para la movilidad". (2016 [Citado el 19 de marzo de 2016]): disponible en <http://gasnam.es/>
- Gazo. "Manual técnico Gazo". Sistemas a Gas Vehicular. (2016 [Citado el 10 de setiembre de 2016]): disponible en <http://www.gazo.com.mx/es/descargas/6-manual-tecnico-gazo/file>
- GENCAT. "Vehículos que utilizan gas como carburante (GLP/GNC)". (2016 [Citado el 3 de octubre de 2016]): disponible en <http://www.gencat.cat/infonorma/pdf/20141013%20PONENCIA%20GLP%20Itevelesa.pdf>
- GNL. "Gas Natural Licuado". (2016 [Citado el 20 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.gnl.es/index.php>
- Hans Sterling Mora, George. "Diésel". Diésel. (2009 [Citado el 21 de marzo de 2016] Slideshare): disponible en http://es.slideshare.net/ghsterlingm/diesel-2473621?next_slideshow=1
- Híbridos y eléctricos. "Los camiones y el medio ambiente". La excelencia medioambiental según Renault Trucks. (2015 [Citado el 17 de abril de 2016]): disponible en <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/camiones-y-medio-ambiente/20150412194427009212.html>
- Ibáñez. "Euro 6". (2015 [Citado el 20 de mayo de 2016] XATAKA): disponible en <http://www.xataka.com/vehiculos/que-es-euro-6-y-por-que-hara-que-tu-proximo-coche-diesel-sea-el-menos-contaminante-de-la-historia>
- LNG Blue Corridors. "LNG Blue Corridors project". (2016 [Citado el 8 de abril de 2016]): disponible en <http://lngbc.eu/>
- Luzon, Javier. Motores de combustión interna. (2013 [Citado el 4 de abril de 2016]).
- MAGRAMA. "Normativa transporte vehículos pesados". Transporte-Vehículos pesados. (2016 [Citado el 29 de mayo de 2016]): disponible en http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/transportes_pesados.aspx
- Ministerio de fomento. "Estrategia española de movilidad sostenible". (2009 [Citado el 12 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/149186F7-0EDB-4991-93DD-CFB76DD85CD1/46435/EstrategiaMovilidadSostenible.pdf>
- MOTOR GAS. "Empresa equipos de gas para motores MOTOR GAS". (2015 [Citado el 13 de febrero de 2016]): disponible en <http://www.motorgas.es/es/>

- P. Benavente, Rocio. "Eduardo Barreiros, el Henry Ford español". Desarrolló la industria del automóvil. (2015 [Citado el 6 de marzo de 2016] El Confidencial): disponible en http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-06-03/eduardo-barreiros-el-henry-ford-espanol-que-empezo-cobrando-2-pesetas-al-dia_867340/
- Perez, Antonio. "Características del gasoil". (2012 [Citado el 27 de marzo de 2016] GNVblog): disponible en <https://gnvblog.wordpress.com/2012/02/03/caracteristicas-del-gasoil/>
- PRTR. "Óxidos de nitrógeno". (2016 [Citado el 23 de abril de 2016]): disponible en <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>
- PRTR. "Hidrocarburos aromáticos policíclicos". (2016 [Citado el 23 de abril de 2016]): disponible en <http://www.prtr-es.es/Hidrocarburos-Aromaticos-Policiclicos-705112007.html>
- PRTR. "Monóxido de carbono". (2016 [Citado el 23 de abril de 2016]): disponible en <http://www.prtr-es.es/Monoxido-carbono-775112007.html>
- PRTR. "Partículas PM10". (2016 [Citado el 23 de abril de 2016]): disponible en <http://www.prtr-es.es/Particulas-PM10-691112007.html>
- Puig I Godés, Oriol. La Contaminació atmosfèrica. Barcelona: Generalitat de Catalunya, 1995.
- Red ciudad es clima. "La estrategia Española de Movilidad Sostenible y los Gobiernos Locales". Documento apoyo a la estrategia de movilidad sostenible. (2010 [Citado el 13 de marzo de 2016]): disponible en <http://www.redciudadesclima.es/files/documentacion/2a7fb70e4f9cfdd19fbd05d0240327b0.pdf>
- SIEMENS. "LMS Samtech Tea Pipe". (2016 [Citado el 4 de febrero de 2016]): disponible en http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/samtech/
- SIEMENS. PDF LMS Samtech Tea Pipe Quick Start. (2016 [Citado el 5 de setiembre de 2016]).
- SIEMENS. PDF LMS Samtech Tea Pipe Users Guide. (2016 [Citado el 16 de setiembre de 2016]).
- SCANIA. "Motor SCANIA V8". (2016 [Citado el 18 de julio de 2016]): disponible en <http://www3.scania.com/es/New-V8-truck-range/Nuevo-motor-V8/>
- SCANIA. Programa Multi SACNIA. (2016 [Citado el 17 de julio de 2016]).
- Taller de mecánica. "El motor diésel". Common Rail, nociobes básicas. (2016 [Citado el 25 de julio de 2016]): disponible en <http://www.tallerdemecanica.com/blog/64-common-rail-nociobes-basicas>
- UCLM. Ciclo teórico de funcionamiento. (2014 [Citado el 14 de marzo de 2016]): disponible en https://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/motores/temas/ciclo_teorico.pdf
- Unión europea. "Política de transportes de la UE". (2016 [Citado el 8 de marzo de 2016]): disponible en https://europa.eu/european-union/topics/transport_es
- Vargas Medina, Edgard. Sistemas y tecnología de motores diésel. Exposición motores diésel. (2015 [Citado el 3 de abril de 2016] SlideShare): disponible en <http://es.slideshare.net/EdgarVargasMedina/exposicion-motores-diesel>
- Wikipedia. "Movilidad sostenible". (2016 [Citado el 5 de marzo de 2016]): disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Movilidad_sostenible
- Wikipedia. "Sustainable transport". (2016 [Citado el 10 de marzo de 2016]): disponible en https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_transport
- Wikipedia. "Óxido de nitrógeno". (2016 [Citado el 21 de abril de 2016]): disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_nitr%C3%B3geno_\(II\)](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_nitr%C3%B3geno_(II))
- Wikipedia. "Eduardo Barreiros". (2016 [Citado el 5 de marzo de 2016]): disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Eduardo_Barreiros
- Wikipedia. "Gasóleo". (2016 [Citado el 21 de marzo de 2016]): disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/Gas%C3%B3leo>

Wikipedia. "Compressed natural gas". (2016 [Citado el 12 de abril de 2016]): disponible en https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed_natural_gas

Wikipedia. "Sequential quadratic programming". (2016 [Citado el 19 de setiembre de 2016]): disponible en https://en.wikipedia.org/wiki/Sequential_quadratic_programming

Zambrano Caballería, Gerek. "Dibujo técnico". Sistemas de representación. (2014 [Citado el 6 de setiembre de 2016] SlideShare): disponible en <http://es.slideshare.net/Zerojustice/clase-4-dibujo-tecnico-sistema-de-representacin>

3dcadportal. "CATIA". (2016 [Citado el 17 de mayo de 2016]): disponible en <http://www.3dcadportal.com/catia.html>